

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 34

Научно-теоретический журнал
Специальный выпуск

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2074-2762



Санкт-Петербург
2014

УДК 3 + 502.52 + 55

ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 34. Научно-теоретический журнал. Специальный выпуск. — СПб.: РГГМУ, 2014. — 148 с.

ISSN 2074-2762

Представлены статьи сотрудников университета и приглашенных специалистов по теме «Лимнология».

Предназначен для ученых, исследователей природной среды, экономистов природопользования, аспирантов и студентов, обучающихся по данным специальностям.

Редакционный совет:

Л.Н. Карлин, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор РГГМУ, председатель;

Р.М. Вильфанд, д-р техн. наук, директор ГМНИЦ РФ; **А.И. Грабовский**, начальник Департамента Гос. Гидрометслужбы по СЗФО РФ; **Ю.В. Кулешов**, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. Начальника Военно-инженерной академии им. Ф.М. Можайского; **В.А. Румянцев**, академик РАН, директор института Озероведения РАН; **М.П. Федоров**, академик РАН, научный руководитель программы НИУ СПб ГПУ; **И.Е. Фролов**, д-р техн. наук, профессор, директор ГНЦ ААНИИ; **Б. Шапроц**, д-р наук, ведущий ученый института морских исследований IFREMER (Франция).

Редакционная коллегия:

Главный редактор: **Л.Н. Карлин**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Зам. главного редактора: **В.Н. Воробьев**, канд. геогр. наук.

Члены редколлегии: **Н.Б. Барышников**, д-р геогр. наук, проф.; **Л.П. Бескид**, д-р техн. наук, проф.; **В.Н. Малинин**, д-р геогр. наук, проф.; **И.Г. Максимова**, отв. секретарь; **Н.В. Мякишева**, д-р геогр. наук, проф.; **Н.П. Смирнов**, д-р геогр. наук, проф.; **А.И. Угрюмов**, д-р геогр. наук, проф.; **И.П. Фирова**, д-р эконом. наук, проф.

ISSN 2074-2762

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному Федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 07.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Подписной индекс 78576 в каталоге «Каталог российской прессы «Почта России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки <http://elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции: Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Тел.: (812) 444-81-55

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2014

© Авторы публикаций, 2014

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

FEDERAL STATE-FUNDED EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER VOCATIONAL EDUCATION
RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL
UNIVERSITY

Nº 34

A theoretical research journal
Special Issue

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2074-2762



St. Petersburg
2014

UDA 3 + 502.52 + 55

LBC 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 34. — St. Petersburg: RSHU Publishers, 2014. — 148 pp.

ISSN 2074-2762

The journal presents research papers of the University associates and invited specialists on Limnology.

The journal is intended for scientists studying the environment, specialists in economics of nature management, PhD students and undergraduates specializing in these fields of knowledge.

Editorial Board:

L.N. Karlin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Rector of RSHU, Chairman;

R.M. Vilfand, Doctor of Technical Sciences, Director of Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation; **A.I. Grabovsky**, Head of the North-Western Department of Roshydromet; **U.V. Kuleshov**, Doctor of Physics and Mathematics, deputy Head of Military Space Academy named after F.M. Mozhaisky; **V.A. Rumyantsev**, member of the Academy of Sciences, Director of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Science; **M.P. Fedorov**, member of the Academy of Sciences, research advisor of National Research University of St. Petersburg State Polytechnical University; **I.E. Frolov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of State Research Center «Arctic and Antarctic Reserch Institute»; **B. Chapron**, Doctor, Leading scientist of Institute for Marine Research IFREMER (France).

The Editorial Board:

Editor in Chief: **L.N. Karlin**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.

Deputy Editor in Chief: **V.N. Vorobyev**, PhD. of Geographical Sciences.

Members of the Editorial Board: **N.B. Baryshnikov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **P.P. Beskid**, Doctor of Engineering, Professor; **V.N. Malinin**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **I.G. Maximova**, executive secretary; **N.V. Myakisheva**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **N.P. Smirnov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **A.I. Ugryumov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **I.P. Firova**, Doctor of Economics, Professor.

ISSN 2074-2762

The Journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, which should publish the main results of theses for the Doctor and Candidate of sciences degree.

The Journal is registered in the Russian Federal Surveillance Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection in the North-western Federal District.

Certificate ПИ № ФС2-8484 of July 02, 2007.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geoecology, geophysics, social and human sciences.

Subscription index 78576 in «Catalogue of the Russian press «Post of Russia».

The Journal is included in the «Russian Science Citation Index» database (RSCI), based on the platform of the National Electronic Library (<http://elibrary.ru>).

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

Editorial Office address: 195196, Malookhtinsky Ave, 98, St. Petersburg, Russia
Tel.: +7 812 444-81-55

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2014

© Authors of publications, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

А.М. Догановскому — 80 лет.	7
Предисловие	8
Гидрология	
<i>Догановский А.М.</i> «Гидрология озер и водохранилищ» в цикле гидрологических дисциплин	9
<i>Жирков И.И.</i> Схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России.	18
<i>Науменко М.А., Гузиватый В.В., Сапелко Т.В.</i> Цифровые морфометрические модели малых озер	26
<i>Волчек А.А., Кирвель И.И., Кирвель П.И.</i> Колебания составляющих водного баланса озер Беларуси в современных климатических условиях	33
<i>Турсунов Э.А., Мадиебеков А.С., Кулебаев К.М.</i> Современные морфометрические характери- стики оз. Балкаш	43
<i>Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И.</i> Влияние изменений климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России	48
<i>Земцов В.А., Вершинин Д.А., Дубцов А.Л., Тарасов А.С.</i> Влияние урбанизации на деградацию озер и рекомендации по ее предотвращению (на примере озера Белое в черте г. Томска)	56
<i>Мякишева Н.В., Жумангалиева З.М.</i> Современное состояние антропогенно нагруженных пресноводных озер северного Казахстана.	63
<i>Игнатьева Н.В.</i> Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадков — вода в Псковско- Чудском озере.	71
<i>Голосов С.Д., Зверев И.С., Шипунова Е.А.</i> Моделирование сезонной динамики концентрации растворенного кислорода в озерах Псковско-Чудской системы.	79
<i>Сутырина Е.Н.</i> Применение материалов дистанционного зондирования для изучения осо- бенностей разрушения снежно-ледяного покрова на озере Байкал и озере Хубсугул	85
<i>Фашевский Б.В.</i> О допустимых преобразованиях в речных экосистемах	93
<i>Догановский А.М., Угенинов Г.Н.</i> Разработка методики установления начала отсчета шири- ны водоохранной зоны на неизученных озерах	103
<i>Биненко В.И., Иванов Р.В., Родионов В.З.</i> Мониторинг рек, озер, суши на основе использо- вания беспилотных летательных аппаратов	106
<i>Киселев Е.Ю., Румянцев В.А., Рыбакин В.Н.</i> Применение ультразвукового излучения низкой интенсивности для борьбы с «цветением» воды в водоемах. Механизмы воздействия на водоросли	115
<i>Нестеров Н.А., Кокорин В.И.</i> Способ определения загрязненности воды измерением скоро- сти распространения звука.	123
<i>Гончаров А.В., Абдуллаева К.М.</i> Особенности фитопланктона Москворецких водохранилищ в связи с их глубоководностью и изменением уровня воды.	128
<i>Шмакова М.В., Кондратьев С.А.</i> Оценка заиления водохранилищ по данным о годовом твердом стоке притоков (на примере Сестрорецкого Разлива).	134
И.Ф. Горошкову — 100 лет.	142
Список авторов	143

CONTENTS

A.M. Doganovsky — 80 years	7
Foreword	8
Hydrology	
<i>Doganovsky A.M.</i> «Hydrology of lakes and reservoirs» in hydrological cycle disciplines	9
<i>Zhirkov I.I.</i> Classification scheme of limnological genetic lakes North-East Russia	18
<i>Naumenko M.A., Guzivaty V.V., Sapelko T.V.</i> Digital morphometric models of small lakes.	26
<i>Volchek A.A., Kirvel I.I., Kirvel P.I.</i> Variations (oscillations) of lakes water balance of Belarus in the current climate conditions.	33
<i>Tursunov I.A., Madibekov A.S., Kulebaev K.M.</i> Present morphometrical parametrs of Balkhash lake.	43
<i>Filatov N.N., Rukhovets L.A., Nazarova L.E., Georgiev A.P., Ephraim T.V., Pal'shin N.I.</i> Climate change impacts on the ecosystem of lake north of European Russia.	48
<i>Zemtsov V.A., Vershinin D.A., Dubtsov A.L., Tarasov A.S.</i> Influence of urbanization on degradation of lakes and recommendations for its prevention (the White Lake in the city of Tomsk as a case study) ...	56
<i>Myakisheva N.V., Zariia Zhumangalieva</i> Current state of anthropogenically stressed freshwater lakes of Kazakhstan.	63
<i>Ignatyeva N.V.</i> Estimation of phosphorus fluxes in the sediment — water boundary zone in Lake Peipsi. ...	71
<i>Golosov S.D., Zverev I.S., Shipunova E.A.</i> Modeling seasonal changes in content of dissolved oxygen in Pskovsko-Chudskoye lake system.	79
<i>Sutyryna E.N.</i> Application of the remote sensing data to the study of the features of the destruction of snow-ice cover of Lake Baikal and Lake Hovsgol	85
<i>Fashevsky B.V.</i> Admissible transformations in river ecosystems.	93
<i>Doganovsky A.M., Ugreninov G.N.</i> Development of method for establishing the beginning of reference for width water protection zone unexplored lakes	103
<i>Binenko V.I., Ivanov R.V., Rodionov V.Z.</i> Monitoring of rivers, lakes, land-based use of unmanned aerial . .	106
<i>Kiselev E.Yu., Rumyantsev V.A., Rybakin V.N.</i> Application of low intensity ultrasound for preventing algal blooms in water bodies. Mechanisms of action on algae	115
<i>Nesterov N.A., Kokorin V.I.</i> The method for definition of water pollution with measure speed of sound . .	123
<i>Goncharov A.V., Abdullayeva K.M.</i> Features of phytoplankton of Moskvoreckie reservoirs in connection with their depth and water level change	128
<i>Shmakova M.V., Kondratyev S.A.</i> Assessment of reservoir sedimentation based on data of annual sediment discharge in tributaries (Sestroretskiy Rasliv as a case study).	134
I.F. Goroshkov — 100 years	142
List of authors.	143

А.М. Догановскому – 80 лет



Догановский Аркадий Михайлович, доктор географических наук, профессор, заслуженный работник Высшей школы России, академик РАЕН, Почетный работник Гидрометслужбы России, действительный член Русского географического общества, член УМО ВУЗов РФ по образованию в области гидрометеорологии, декан гидрологического факультета Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автор фундаментальных учебников и учебных пособий по курсу «Гидрология суши». Опубликовано более 120 научных, научно-методических работ в российских и зарубежных изданиях.

В настоящее время руководит магистерской подготовкой по программе «Гидрологии озер и водохранилищ».

ПРЕДИСЛОВИЕ

Аркадий Михайлович в конце XX — начале XXI века является одним из квалифицированных и опытных лимнологов России. После окончания гидрологического факультета ЛГМИ в 1957 году молодой специалист участвовал в экспедиционных работах в Сибири и на Дальнем Востоке, приобрел опыт практической работы в полевых условиях. Полученные знания легли в основу его кандидатской диссертации по расчету речного и наледного стока рек Северо-Восточной Сибири, защищенной в 1970 году. Постепенно его научные исследования все более стали сосредотачиваться на изучении озер. Процессы внешнего и внутреннего водообмена, пространственно-временные изменения уровней озер, влияние строения озерных и озерно-речных систем на гидрологический режим водоемов явились главными направлениями докторской диссертации, защищенной в 1994 году.

А.М. Догановский много сил и знаний отдает преподавательской работе. Многие годы им читаются курсы и ведутся занятия по гидрологии суши, гидрорасчетам, учении о гидросфере. Большое количество дипломных проектов, магистерских и аспирантских диссертаций подготовлено и защищено под руководством профессора Догановского. Фундаментальные учебные пособия «Гидросфера Земли» (2004), «Гидрология суши» (2012) и практикумы по этим курсам используются во многих вузах России. В 2008 году Аркадию Михайловичу присвоено почетное звание «Заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации».

Для формирования сборника статей по лимнологии были разосланы приглашения принять участие вузам, научным учреждениям. Географический диапазон статей и их авторов-лимнологов, впечатляет: от Беларуси на западе до Иркутска и Якутска на востоке, от Петрозаводска на севере до Алматы на юге.

Тематика статей актуальна, разнообразна и современна. В статьях рассматриваются методические аспекты озероведения, инновационные методы исследования озер, предлагаются и обсуждаются новые классификации озер различных регионов Евразии, новые подходы к анализу морфометрических характеристик озер на основе цифровых моделей, рассматриваются проблемы, связанные с влиянием изменения климата на экосистемы озер.

Сборник статей преследовал цель сделать его полезным широкому кругу специалистов, как работающих в области фундаментальной лимнологии, так и занятых решением практических инженерных задач в этой области естествознания.

Предисловие к сборнику статей, посвященному юбилею известного исследователя озер профессора А.М. Догановского, хочется завершить пожеланиями новых творческих успехов и здоровья. Ответственные редакторы сборника, коллеги, друзья-лимнологи полностью согласны с цитатой из трактата Генри Дэвида Торо «Уолден, или Жизнь в лесу»: «Озеро — самая выразительная и прекрасная черта пейзажа. Это — око Земли, и, заглянув в него, мы измеряем глубину собственной души».

А.М. Догановский

«ГИДРОЛОГИЯ ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ» В ЦИКЛЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

A.M. Doganovsky

«HYDROLOGY OF LAKES AND RESERVOIRS» IN HYDROLOGICAL CYCLE DISCIPLINES

Показано, что основные запасы материковых вод заключены в озерах и водохранилищах, а их режимные характеристики заметно отличаются от водного режима рек и других водных объектов. Рассмотрены особенности процессов происходящих в озерах, водохранилищах и на их водосборах, приведены виды хозяйственной деятельности. Показано, что эти вопросы являются предметом комплексного изучения гидрологии озер и водохранилищ. Приведены и другие направления связанные с изучением этих водных объектов: лимнология, озероведение, гидроэкология. Обоснована необходимость подготовки высококлассных специалистов в области гидрологии озер и водохранилищ. Показано состояние такой подготовки в настоящее время в нашей стране.

Ключевые слова: озеро, водохранилище, гидрология, лимнология, озероведение, экология, регулирование стока, гидрологический режим, плотины, хозяйственная деятельность.

Shown that most of the continental waters enclosed in lakes and reservoirs and their performance characteristics differ markedly from the water regime of rivers and other water bodies. The features of the processes occurring in lakes, reservoirs and their watersheds, given economic activities. It is shown that these issues are the subject of a comprehensive study of the hydrology of lakes and reservoirs. Shows and other areas related to the study of these water bodies, limnology, limnology, hydroecology. The necessity of training highly qualified specialists in the field of hydrology of lakes and reservoirs. Shows the status of this training is currently in our country.

Key words: lake, reservoir, hydrology, limnology, limnology, ecology, flow regulation, hydrological regime, dams, economic activity.

Введение

Гидрология суши — наука о водах суши, которая занимается изучением природных вод, явлений и процессов, в них протекающих. При этом основная масса воды на материках содержится в водных объектах: реках, озерах, водохранилищах, болотах, горных

ледниках. Всего в этих объектах сосредоточено около 300000 км^3 воды. В том числе в руслах рек 2150 км^3 , в озерах 176000 км^3 (без Каспия), в водохранилищах 6600 км^3 . Таким образом, основная масса поверхностных вод суши сосредоточена в водоемах (озера, водохранилища, пруды). На земном шаре по самым приближенным подсчетам имеется 8–9 млн озер и 60 тыс. водохранилищ. В том числе в России 2,5 млн озер и 1162 водохранилища, а также 150–175 тыс. малых водохранилищ-прудов. При этом распределение водоемов по территории страны имеет определенные закономерности.

Вопросами изучения водоемов, их происхождением, развитием, водным режимом, разработкой схем рационального использования и охраны, биологическими аспектами, проблемами загрязнения занимается большое количество специалистов разного профиля, которые призваны решать свои узкие задачи. Однако комплексное изучение этих водных объектов все же возложено на гидрологов.

Проблемы гидрологии озер и водохранилищ

Естественные озера сосредоточены в местах, где имеются котловины и вода. Поэтому эти объекты распространены практически повсеместно, но наибольшие их скопления приурочены к областям древнего и современного оледенения, к районам крупных тектонических разломов земной коры и к засушливым, бессточным территориям. Количественным показателем распределения озер служит коэффициент озерности (f_o). Средняя озерность для Земного шара составляет 1,5 %. При этом наблюдается определенная закономерность в распределении f_o , связанная как с происхождением котловин, так и с особенностями климата. На рис. 1 приведена карта-схема озерности территории России.

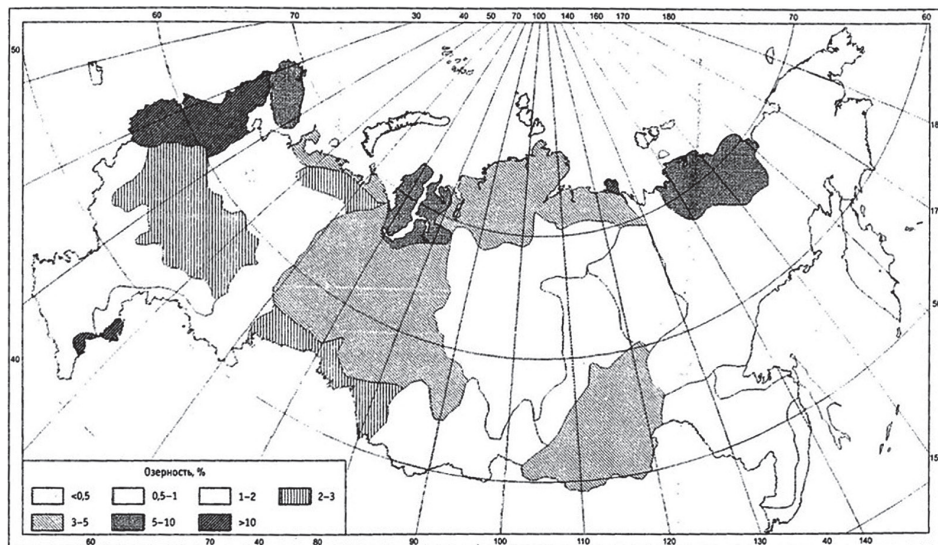


Рис. 1. Озерность территории Российской Федерации

Максимальное количество озер сосредоточено в зоне распространения последнего Валдайского оледенения. Здесь величины f_0 достигают 12–13 %, в отдельных случаях превышая 20 %. В этом районе находятся крупнейшие озера Европы: Ладожское, Онежское, Чудско-Псковское и др. Высокая озерность наблюдается и в сопредельных районах Финляндии, Беларуси, стран Балтии. На карте также видно, что повышенная озерность (3–10 %) свойственна северным регионам, а также Западной Сибири. На остальной территории озерность меньше 2 %, за исключением области распространения бессточных озер засушливых территорий Забайкалья, юга Западной Сибири, сопредельной территории Казахстана, где величины f_0 возрастают до 3–5 %. Здесь расположены такие крупные озера как Балхаш, Б.Чаны, Кулундинское, Зун-Торей и др. Все бессточные озера, как правило, имеют повышенную минерализацию.

Самое крупное озеро на территории нашей страны и в мире — Каспийское море имеет площадь зеркала 390000 км² и запасы воды 78200 км³. Озеро Байкал самое глубокое озеро Земли, а запасы чистой пресной воды составляют 23615 км³.

Весьма условно, но можно говорить о наличии северного и южного озерных поясов. Подобная закономерность наблюдается и в западном полушарии. Распределение озер по градациям их площадей приведено в табл. 1. Озера с площадью зеркала менее 1 км² составляют около 98 % общего их количества в России.

Таблица 1

Озера России по градациям площади зеркала

Площадь зеркала, км ²	Количество озер			Суммарная площадь зеркала, км ²
	ЕТР	АТР	Россия в целом	
1–10	4830	28370	33200	76940
10–50	429	1274	1703	32790
50–100	38	125	163	11163
100–1000	20	69	89	20924
> 1000	4	4	8	74020
Всего:	5321	29842	35163	215837

Такое большое количество озер играет заметную роль в жизни материков и в хозяйственной деятельности человека. Скопления озер образуют озерные ландшафты, представляющие собой озерные комплексы, связанные со спецификой морфологии территории. Озера также являются составной частью гидрографической сети, а основная их функция — аккумуляция воды и регулирование речного стока. Использование озер в хозяйственных целях весьма разнообразно и связано с типом водоема. Так бессточные озера являются водоприемниками-накопителями солей, которые широко используются в галургии. Также озера служат источниками водоснабжения и орошения полей. Большей частью крупные озера, озерно-речные системы являются водными путями. В случае создания плотин на вытекающих из озер реках эти объекты становятся водохранилищами ГЭС. Озера также широко используются для рыболовства и рыбоводства, как объекты рекреации, водоемы-охладители ГРЭС и АЭС, добычи сапропеля, для целей бальнеологии и т.п.

Рассматриваемые озера наряду с разными размерами их площадей имеют различные по объему и по форме котловины. Эти различия связаны с неодинаковыми условиями происхождения первоначальных депрессий и периодами их эволюции. При этом решающую роль играют особенности климата и характер подстилающей поверхности. Разнообразными являются и другие морфометрические характеристики, величины удельных водосборов.

Совокупность перечисленных характеристик предопределяет формирование особых черт гидрологического режима озер, заметно отличающегося от речного и морского. Так движение воды в реках осуществляется под действием силы тяжести, в то время как на озерах — главным образом под действием ветра. Лишь в отдельных случаях в озерах могут возникнуть градиентные течения, а на речных плесах — ветровые. Форма и размеры озерных котловин играют заметную роль в формировании внутриводоемных процессов. Для морей влияние котловин менее ощутимо.

Важной особенностью озер при формировании их гидрологического режима является замедленный внешний водообмен. Интенсивность этого процесса определяется соотношением годового притока воды в озеро и объемом содержащейся в нем воды. Для разнотипных озер интенсивность водообмена изменяется от нескольких суток до столетий. Чем медленнее сменяется вода в озере, тем выше внутрирядная связанность рядов уровня воды, тем четче проявляются низкочастотные колебания уровня, фиксируются периоды повышенной и пониженной водности, тренды. Таким образом, озера особенно слабопроточные и бессточные, могут служить индикаторами изменений климата территорий, на которых они расположены.

Интенсивность водообмена оказывает влияние и на внутриводоемные процессы: заиление котловин, засоление, изменение физико-химических свойств озерной воды. Заиление предопределяет накопление в котловине твердого материала, который подвергается воздействию биологических и физико-химических процессов и со временем превращает их в характерные озерные илы.

Колебание уровня воды в озере оказывает влияние на переработку береговой зоны, а это в свою очередь предопределяет условия зарастания озера. Заиление и зарастание озер может привести к исчезновению водоемов и образованию других водных объектов — болот. Особое внимание следует обратить на класс бессточных озер, расположенных в зоне недостаточного увлажнения, запасы воды в них превышают 30 % общих запасов озерных вод. Благодаря высокой плотности воды, гидрологический режим соленых озер существенно отличается от режима пресных озер и тем более рек.

Отличается от речного и термический режим озер, характерной особенностью которого является установление сезонных термических стратификаций для глубоких водоемов, формирование плотностных течений и внутреннего водообмена. При замерзании и вскрытии озера заметную роль играет ветровая деятельность, разрушающая ледяной покров в отличие от турбулентности потока на реках. Да и лед на озерах толще.

Перечисленные процессы и результаты их действия, характерные для озер, являются предметом изучения *гидрологии озер*. Эта часть гидрологии суши направлена на изучение среды обитания биотических компонент озерных экосистем. Биотические компоненты озер представлены разнообразными водными растениями и живыми организмами (*биота* или *гидробионты*), которые распространены повсеместно, за

исключением соляных и вулканических объектов. Условия обитания гидробионтов определяются физико-географическими условиями, в которых находятся водоемы, т.е. являются зональными. Тем не менее, условия, определяющие состояние среды обитания для разных озер (абиотические факторы), могут быть различными, неодинаковыми становятся и условия существования водной растительности и живых организмов (биотические факторы). Согласно А. Тенсли (1935) функционирующее взаимодействие абиотических и биотических факторов представляет собой *озерную экосистему*, являющуюся предметом изучения *гидроэкологии*. В тоже время наука, занимающаяся исследованием комплекса физико-географических, гидрохимических и биологических процессов, происходящих в озере, называется *лимнология* или *озеро-ведение*. При этом рассматривается весь комплекс внутриводоемных или лимнических процессов, протекающих в озере, в тесной связи с водосбором.

Таким образом, существует несколько близких по смыслу терминов характеризующих науку, изучающую озера и процессы, происходящие в них. По мнению А.И. Чеботарева (1978), для обозначения комплекса гидрологических знаний об озерах следует пользоваться термином *гидрология озер*, а термин лимнология использовать при рассмотрении их биологических особенностей. Хотя в научной и учебной литературе по гидрологии термин лимнология иногда употребляется как синоним гидрологии озер.

Водохранилища — *искусственные водоемы* создаются для рационального использования водных ресурсов. На территории России и сопредельных государств имеется более 3700 водохранилищ, в том числе на территории нашей страны — 1162. Их полный объем равен соответственно почти 2120 км³ и 925 км³, а площадь зеркала составляет 260 и 115 тыс. км². В том числе без подпруженных озер 150 тыс. км² и 63 тыс. км².

Водохранилищ с объемом воды более 1 км³ в России насчитывается 49, их полный объем составляет 892 км³. Среди крупнейших водохранилищ Мира по объему воды Братское водохранилище занимает второе место после африканского водохранилища Виктория (205 км³), на седьмом месте Красноярское водохранилище после Братского, Насер, Виктория, Вольта, Кариба (Африка), Даниэль-Джонс (Северная Америка). По площади зеркала Братское водохранилище также одно из самых больших, еще больше площадь Куйбышевского водохранилища на Волге.

Широкое использование водохранилищ предопределило их размещение по территории. Создание разнотипных водохранилищ приурочено к соответствующим областям развития промышленного и сельскохозяйственного производства. Большую роль играют также сложные природные условия, создающие затруднения при строительстве водохранилищ, или, наоборот, наличие благоприятных условий для их создания. Часто на вытекающих из естественных озер реках строятся плотины, и озера превращаются в водохранилища. К числу таких озер относятся Онежское, Байкал, Топозеро и др. На рис. 2 представлена схема размещения водохранилищ на территории России и сопредельных стран.

Схема показывает, что действительно скопление водохранилищ приурочено к промышленным и сельскохозяйственным районам, а также к предгорьям. Особое место отведено каскадам водохранилищ на крупных реках (аналоги озерно-речных систем). Именно здесь сосредоточены крупнейшие водохранилища. Следует отметить, что на карту не нанесены места сосредоточения малых водохранилищ-прудов, география

распространения которых весьма широка. Эти водные объекты создаются, прежде всего, для накопления воды, для рыбоводства, разведения водоплавающей птицы и некоторых других хозяйственных мероприятий. В табл. 2. приведены сведения о крупнейших русловых водохранилищах России.

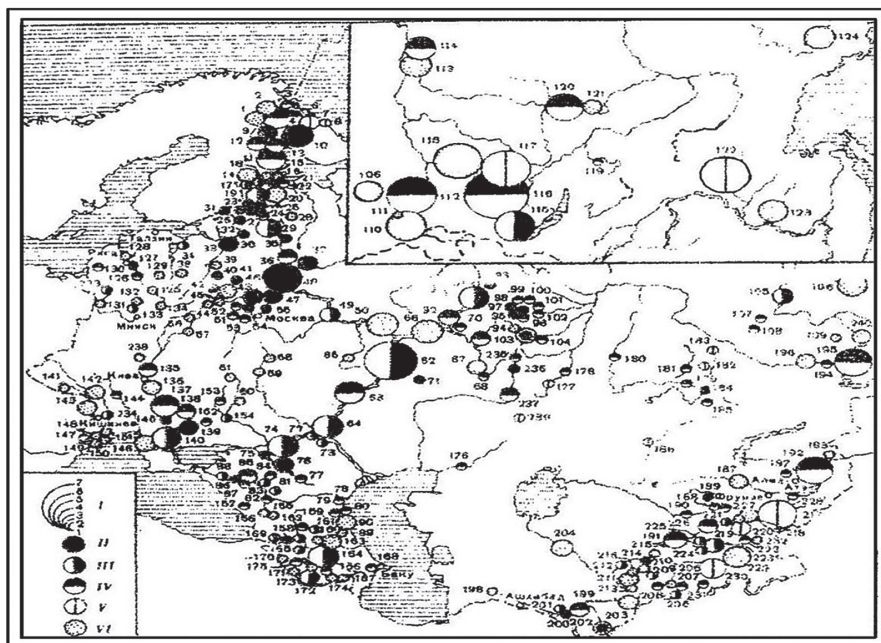


Рис. 2. Схема размещения водохранилищ с полным объемом 100 млн м³ на территории России и сопредельных стран (по Ю.М. Матарзину) [4]

Таблица 2

Сведения о крупнейших русловых водохранилищах России с площадью зеркала > 2000 км²

Название	Река	Год заполнения	Площадь зеркала при НПУ, км ²	Полный объем, км ³	Напор, м
Куйбышевское	Волга	1955–1957	6448	56,0	25
Братское	Ангара	1961–1967	5478	169,3	106
Рыбинское	Волга	1940–1949	4550	25,4	18
Волгоградское	Волга	1958–1960	3117	31,4	27
Цимлянское	Дон	1952–1953	2702	23,9	26
Богучанское	Ангара	строящееся	2325	58,2	
Вилуйское	Вилуй	1965–1972	2176	35,9	68
Зейское	Зея	1974	2119	68,4	98
Красноярское	Енисей	1967	2000	73,3	100

Водохранилища, прежде всего, являются регуляторами речного стока. В настоящее время около 50 % естественного речного стока России искажено действиями водохранилищ. Также водохранилища необходимы для решения целого ряда узкоотраслевых и межотраслевых задач. В России главными видами их использования являются: гидроэнергетика, теплоэнергетика, ирригация и водоснабжение. Равнинные водохранилища используются для судоходства. Так около 10 % внутренних водных путей в первую очередь на Волге, Каме, Свири проходит по водохранилищам. Около 15 % всей электроэнергии вырабатывается на гидроэлектростанциях. Многие водохранилища обеспечивают водой тепловые и атомные станции. Почти 50 % всех орошаемых земель страны используют водные ресурсы водохранилищ. Большую роль играют водохранилища для коммунально-бытового и особенно промышленного водоснабжения, для рекреации, для рыбного хозяйства. На реках Дальнего Востока и в некоторых районах предгорий водохранилища часто создаются для борьбы с наводнениями. В тоже время создание водохранилищ, приводящее к изменению всего природного комплекса реки, в ряде случаев, например, в области гидробиологии, оценивается как негативное.

Такое широкое использование водохранилищ предполагает многоплановое их изучение. При этом рассматриваемое направление — гидрология водохранилищ по Ю.М. Матарзину (2003) — раздел гидрологии суши, занимающийся изучением искусственных водоемов замедленного водообмена, режим которых формируется под действием сложного взаимодействия генетически разнородных (природных и, особенно, антропогенных) факторов. При изучении гидрологии водохранилищ также необходимо знать происхождение и особенности строения котловин («емкость ложа» по К.К. Эдельштейну), размеры и строение водосборов, климатические условия. Следует также учитывать для русловых водохранилищ наличие речной и приплотинной частей, а следовательно и различие их гидрологического режима. Создание на реках водохранилищ резко меняет гидрологический режим этих водотоков: нарушается режим уровня воды, замедляется водообмен, уменьшается транзит веществ поступающих с водосбора. Зимний режим водохранилищ, как правило, характеризуется большим уровнем сработки, оседанием на берегах льда. Создание крупных водохранилищ приводит к изменению микроклимата побережий, подъему уровня грунтовых вод.

Подготовка высококвалифицированных специалистов в области гидрологии озер и водохранилищ

Столь большой интерес к озерам и водохранилищам — специфическим водным объектам, их широкое использование в хозяйственных целях предполагает подготовку высококвалифицированных специалистов в области гидрологии озер и водохранилищ. При этом область рассматривается как раздел гидрологии суши, изучающий внутренние водоемы. Основная задача названных специалистов сводится к изучению этих водных объектов, их водосборов для целей рационального использования и охраны. Подготовка таких специалистов (иногда — гидрологов с лимнологическим направлением) проводится во многих ВУЗах страны. Как правило, дисциплина «гидрология

озер и водохранилищ» включается в профессиональный цикл вариативной части образовательного стандарта по направлениям «Гидрометеорология» и «Прикладная гидрометеорология» (бакалавриат, магистратура).

Однако эта дисциплина не везде представлена единым учебным курсом, а входит составной частью в другие дисциплины (гидрология, гидрофизика, основы управления водными ресурсами и т.п.) или изучается как «дисциплина по выбору», в виде «спекурса» и т.п. Экспресс-опрос некоторых ВУЗов позволил установить, что вопросы гидрологии озер и водохранилищ рассматриваются на географических, экологических факультетах государственных университетов. Лимнологическое направление образования проводится в ряде педагогических, политехнических ВУЗах, в институте водного транспорта, в Российском государственном гидрометеорологическом университете и в некоторых других высших учебных заведениях. При этом степень подготовки таких специалистов в разных ВУЗах различна, о чем говорит неодинаковое количество затрачиваемых зачетных единиц.

Выпуск гидрологов, имеющих хорошую подготовку в области озер и водохранилищ, отмечен, прежде всего, в МГУ на географическом факультете, где разработан и читается курс «Гидрология озер и водохранилищ», также подготовлен практикум по этому предмету. Лимнологическую практику студенты проходят на хорошо оборудованной учебной базе. Так же углубленно и отдельно студенты изучают гидрологию водохранилищ.

Традиционно на протяжении многих лет в Пермском государственном университете существует направление «Гидрология водохранилищ». К сожалению, учебная практика не проводится, но многие студенты регулярно участвуют в производственных практиках на водохранилищах.

Достаточно большой материал в области гидрологии озер и водохранилищ осваивается в РГГМУ, где раздел «Гидрология озер и водохранилищ» наряду с речной гидрологией входит в состав учебного курса «Гидрология суши» и изучается в течение целого семестра. Часть учебной практики по гидрометрии проводится на водохранилище.

Курс «Гидрология озер и водохранилищ» читается на кафедре гидрологии суши СПбГУ, проводятся и учебные практики. Рассматриваемый предмет изучается также в Башкирском, Томском государственных университетах.

Вопросам гидрологии озер и водохранилищ, как составной части других дисциплин отведено место в Карельском, Иркутском, Алтайском университетах и ряде других отмеченных выше ВУЗов.

Большое место при получении знаний по названным разделам гидрологии занимают производственные практики на озерах и водохранилищах, куда выезжает небольшое количество студентов.

Наиболее же полные знания по гидрологии озер и водохранилищ студенты получают при обучении в магистратуре. Например, магистерские направления по гидрологии озер и водохранилищ имеются в МГУ, РГГМУ. Однако здесь количество выпускников гидрологов со специальной подготовкой весьма ограничено. Также такие специалисты готовятся через аспирантуру.

Таким образом, гидрологов с подготовкой в области гидрологии озер и водохранилищ готовят многие ВУЗы. Тем не менее, учитывая огромное количество озер и

водохранилищ, которые все шире будут использованы в хозяйственных целях, предполагаемое расширение строительства новых ГЭС, модернизация старых, усиление охраны природы (в том числе, озерных ландшафтов), прудовое хозяйство потребуют более глубоких знаний по лимнологии, в том числе с инженерным направлением. Поэтому целесообразно дисциплину «Гидрология озер и водохранилищ» расширить в сторону комплексного изучения водоемов. Усиление значимости рассматриваемого направления возможно при переводе дисциплины «Гидрология озер и водохранилищ» в разряд базовых.

Новая отечественная учебная литература по гидрологии озер и водохранилищ

Подготовка рассматриваемых специалистов требует выпуска современных учебников, учебных пособий, учебных программ. Такие источники конечно же есть, но к числу новейших следует отнести:

1. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Современные проблемы гидрологии. — М.: изд. центр «Академия», 2008. — 320 с.
2. *Догановский А.М.* Гидрология суши (общий курс). — СПб.: РГГМУ, 2012. — 524 с. Разделы 4.2. Озера и водохранилища, 4.7. Гидрография, 5.2. Гидрология водоемов.
3. *Китаев С.П.* Лимнология для гидробиологов и ихтиологов. — Петрозаводск, Карельский НЦ, РАН, 2007. — 315 с.
4. *Матарзин Ю.М.* Гидрология водохранилищ. — Пермь, 2003. — 296 с.
5. *Прыткова М.Я.* Гидрологический режим и заиление малых разнотипных водоемов Северо-Запада. — СПб.: изд. «Наука», 2011. — 200 с. (Монография может служить учебным пособием).
6. *Эдельштейн К.К.* Гидрология озер и водохранилищ. — М.: изд. «Перо», 2014. — 399 с.

И.И. Жирков

**СХЕМА ЛИМНОГЕНЕТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ОЗЕР
СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**

I.I. Zhirkov

**CLASSIFICATION SCHEME OF LIMNOLOGICAL GENETIC LAKES
NORTH-EAST RUSSIA**

В статье рассматривается ландшафтно-лимногенетическая классификация озер Якутии.

Ключевые слова: котловина, генезис, криолитозона, тип озера.

*The article is devoted to the landscape-limnogenetic classification of the lakes Yakutia.
Key words: hollow, genesis, criolitozone, lake type.*

В связи с особенностями гидрологического режима рек криолитозоны и традиционной приуроченностью сельскохозяйственных населенных пунктов к озерам все большее научно-практическое значение в регионе приобретает комплексное изучение генезиса, закономерностей развития озер, их гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов, закономерностей седиментационных процессов, возможностей хозяйственного освоения и других вопросов современного озераведения.

Проведенные нами многолетние лимнологические исследования и лимносьемочные работы, анализ крупномасштабных специальных карт, интерпретация морфометрических, гидрохимических, гидробиологических и гидрологических особенностей озер позволили автору составить схему морфогенетической классификации озер и разработать справочные типологические показатели такой классификации.

Типологический подход научного познания озер используется автором в целях сравнительного изучения, упорядоченного описания и объяснения существенных признаков и особенностей крайне разнородных по своему составу аквальных дискретных объектов, каковыми являются озерные комплексы.

Классификация озер, в том числе их типология, является по общему мнению, одним из универсальных способов географического мышления. В настоящее время существует множество общих лимнологических, региональных и частных классификаций озер [1–9]. Для разработки морфогенетической классификации озер холодных регионов эти схемы не полностью удовлетворяют требованиям. Во-первых, некоторые из них основываются на односторонних характеристиках, т.е. не являются комплексными, физико-географическими; во-вторых, региональные особенности природы криолитозоны, в частности, наличие мощной толщи многолетней мерзлоты, почти повсеместное распространение льдонасыщенных грунтов, экстремальные гидрометеорологические условия региона затрудняют применение разработанных классификаций. Кроме того,

есть классификации, которые на современном этапе исследовании наших озер не могут быть применены из-за громоздкости комбинаций многочисленных классификационных признаков, т.е. из-за сложности постановки исследований, обеспечивающих эти разработки фактическим материалом, например, классификация И.В. Баранова [10]. Кроме того, существует множество региональных классификаций небольшой группы озер или озер конкретных территорий. Весьма интересны из них не только в узкоспециальном, но и в теоретическом плане, территориальная классификация соляных озер, совмещенная с районированием, А.И. Дзэнс-Литовского [7], классификация прудов мелиоративных систем по их функциональному назначению, разработанная А.К. Чижик [8], генетическая классификация плейстоценовых и голоценовых озер Белоруссии М.А. Вальчик [9] и др.

К примеру, если Центральная Якутия в природно-климатическом отношении целиком расположена в среднетаежной подзоне светло-хвойных лесов, региональные различия ландшафтов определяются не зональными, а тектоно-литологическими, геоморфологическими, криогенными и т.п. аazonальными факторами и наличием пойменных, террасовых, болотных, солончаковых и т.п. интразональных типов местности. Таким образом, вслед за Н.А. Гвоздецким и др. в понятие «ландшафт географический» автор вкладывает типологическое содержание, т.е. один и тот же озерный ландшафт может находиться в пространственно разобщенных участках, обладающих сходством в существенных чертах природы, в истории развития. В связи с этим, и озера, расположенные в них, имеют общий типологический облик, сходные морфометрические и лимнологические показатели, общность происхождения и развития. Поэтому региональную классификацию озер Северо-Востока России автор составил на основе анализа существующих классификаций применительно к экстремальным природно-климатическим условиям региона. Из современных разработок классификаций большой теоретический интерес представляет классификация озер Белоруссии, предложенная О.Ф. Якушко [11–13], которая создана на широкой комплексной лимнологическо-географической основе для своеобразного региона, где значительная часть озерных комплексов формировалась в перигляционных условиях позднеледниковой эпохи.

При составлении принципиальной схемы классификации озер Якутии за основные классификационные критерии автором приняты генезис озерных котловин и пространственно-временные факторы формирования в них озерных комплексов. Типы и подтипы озер в классификации выделены по способу образования котловин и по приуроченности водосборов озер к определенным аazonальным и интразональным ландшафтам (типам местности), а группы и подгруппы озер выделены по их местоположению в пределах морфологических частей ландшафтов (типов местности), а также в зависимости от стадии развития озер. При таком подходе к разработке классификации озер, используя широкую географическую основу, возможно полнее учитывать пространственно-временные факторы развития озер и максимально приблизить классификацию к районированию озер вплоть до использования таксономических единиц классификации в качестве элементов районирования. По мнению автора, преимуществом предлагаемой схемы классификации является также возможность быстрого определения места любого озера в схеме классификации.

Таблица 1

Схема ландшафтно-лимногенетической классификации озер Якутии

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды	Аномалии
1. Термокарстовые	1.1. Провальные	1.1.1. Первичные на ледовом комплексе	а) развивающиеся, стадии «дюзэ»	
			б) то же, стадии «тыымпы»	
			в) то же стадии «юнкюр»	
			г) зрелые с луговым кольцом, стадии «холусалаах»	г.а) соловые минерализованные г.б) сапропелевые
		1.1.2. Первичные на аллювиальных отложениях	а) в поймах рек	
			б) на низких террасах крупных рек	
		1.1.3. Реликтовые (аласные)	а) усыхающие, стадии «уолба»	а.а) соловые минерали-зованные а.б) сапропелевые
			б) эпизодически обводняющиеся сухие аласы	
	1.2. Просалочные	1.1.4. Повторно-провальные	в) эрозионно-провальные	
			а) усыхающих аласов	
			б) булгунняхов	
			в) торфяных бугров	
			г) древних долин стока (в т.ч. «сквозных»)	
			а) на лессовидных суплинках без «ледового комплекса»	
		1.2.1. Суффозионно-просалочные	б) то же с маломощным «ледовым комплексом»	б.а) сапропелевые
			а) в котловинах, созданных лесными пожарами («курунг-кюель»)	
		1.2.2. Пирогенно-просалочные	б) в котловинах, созданных пожарами на торфах и сухих сапропелях («кэрдюген-кюель»)	

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды	Аномалии
2. Водно-эрозионные	2.1. Старичные	2.1.1. Меандровые старицы («элгэн-кюль»)	а) собственно меандровые подкововидные или серповидные	
			б) с термообразно разрушенными внутримеандровыми пространствами	
			а) островные	
		2.1.2. Протоковые старицы	б) пойменные	
			в) надпойменных террасовых равнин нижнего уровня	
3. Эрозионно-термокарстовые	2.2. Плесовые малых рек	2.2.1. В долинах сезонных водотоков		
		2.2.2. В долинах эпизодических водотоков		
		2.2.3. В долинах «травяных рек» («отряхов»)		
		3.1.1. II–III террас «средних» рек (промерзающих водотоков)	а) озера-«бэрэ» (отпочковавшиеся от крупных озер)	
	3.1. Террасовых равнин	3.1.2. III–IV террас «крупных» рек (постоянных водотоков)	а) озера-«бэрэ» б) сапропелевые	
		3.2.1. V–VI террас крупных рек	а) сапропелевые	
	3.2. Аласно-долинные	3.2.2. В древних долинах стока		
		4.1.1. Дефляционные (котловин выдувания)	а) сапропелевые б) межгрядово-низинные	
	4. Тукулановые (озера песчаных массивов)	4.1.2. Навейных котловин (при подпруживании стока навейной дюной)		
		4.2.1. Дефляционные (котловин выдувания)	а) сапропелевые б) межгрядово-низинные	
		4.2.2. Дефляционно-эрозионных котловин		
		4.2.3. Дефляционно-термокарстовые		

Продолжение таблицы 1

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды	Аномалии
5. Карстовые	5.1. Соляного карста	5.1.1. Провальные	а) на сводах соляных куполов	а.а) соляные озера у штоков соли
			б) на сводах соляных антиклиналей	
		5.1.2. Просадочные	а) на крыльях соляных структур	
			б) в компенсационных впадинах и мутьях (карстово-термокарстовые)	
		5.1.3. Озера-плесы	а) бессточных «слепых» замкнутых карстовых падей	
			б) древних сухих или сквозных долин	
			в) современных рек, дренирующих соляные структуры	в.а) соляные старичные соляных рек
				в.б) соляные плесовые в местах разгрузки соляных источников
6. Трапповые	5.2. Карбонатного карста	5.2.1. Коррозийные (поверхностного выщелачивания)		
		5.2.2. Покрыто-провальные	а) пещерные	
	6.1. Водораздельные	6.1.1. На столовых возвышенностях и плато	а) присклоновые на продуктах выветривания траппов	
		6.1.2. На отпрепарированных пластовых интрузиях траппов		
	6.2. Межгрядовые	6.2.1. Грядово-холмистых равнин		
		6.2.2. Межинтрузивных низин		
7. Антропогенные	7.1. Плотинные	7.1.1. Крупных и средних рек (постоянных водотоков)		
		7.1.2. Малых и средних рек (промерзающих водотоков)		
	7.2. Техногенные	7.2.1. Зброшенных карьеров и мест выемки грунтов		
		7.2.2. Воронок взрывов		

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды	Аномалии	
8. Дельтовые	8.1. На современных отложениях дельтовых островов крупных рек	8.1.1. Пойменные			
		8.1.2. Островные			
		8.2. На островах внутриконтинентальных дельт крупных рек	8.2.1. Пойменные		
			8.2.2. Островные		
			8.2.3. Трансформированные термокарстом		
			8.3. На высоких уровнях высоких дельтовых островов	8.3.1. Пойменные	
	9. Ледниково-зандровые	9.1. Ледниковые	8.3.2. Эрозивно-термокарстовые	а) трансформированные просадочным термокарстом	
			8.3.3. Термокарстовые	а) провальное-термокарстовые	
		9.1.1. Конечно-моренные	а) межгрядовых низин		
			б) депрессионные на слабодренированных моренных покровах и языках		
9. Ледниково-зандровые	9.1.2. Подпрудные	а) ригельные			
		б) завальные			
	9.1.3. Каровые	в) горно-долинные			
		а) снежниковые			
	9.1.4. Троговые	б) ледниковые			
		а) собственнотроговые			
	9.2. Зандровые	б) сквознодолинные-троговые			
		9.2.1. На флювиогляциальных песчаных равнинах			
9.2.2. На песчано-щебнистых равнинах	а) моренно-зандровые				
	б) сложенные эрозийными процессами				

Продолжение таблицы 1

Типы	Подтипы	Виды	Подвиды	Аномалии
10. Нагорно-плоскостные	10.1. Горно-долинные	10.1.1. На слабозрезанных и слабоэрозированных долинах нагорий и плато		
		10.1.2. Приналедные		
	10.2. Привершинные	10.2.1. Волораздельные		
		10.2.2. Депрессионные на столовых равнинах пенепленов		
11. Тектонические	11.1. Приразломные	11.1.1. Глубинно-разломные		
		11.1.2. Трещинно-разломные		
	11.2. Грабенные	11.2.1. Провальные		
		11.2.2. Переработанные ледниковой экзарацией		
		11.2.3. Рифтовые	а) собственно рифтовые	
			б) субдукционные	
12. Лагунные	12.1. Лагунные материковые	12.1.1. Расположенные ниже уровня сизигийского прилива (лайды)		
		12.1.2. Отчленившиеся (не подвергавшиеся воздействию морских приливов)	а) висково-сточные	
	13.2. Лагунные островные	то же	б) рассеянно- или грунтово-сточные	
			то же	
13. Вулканические	13.1. Кратерные	13.1.1. Собственно кратерные		
		13.1.2. Кратерно-снежниково-ледниковые		
	13.2. На продуктах разрушения вулканических конусов	14.2.1. Реликтивно-вулканические		
		14.2.2. Подпитываемые минеральными источниками		
14. Космогенные	14.1. Метеоритные	14.1.1. Ударные		
	14.2. Астрообломные	14.2.1. Ударно-взрывные		

Принципиальная схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России основана на материалах многолетних полевых исследований, полученных в основном в период летней стагнации (июнь—август). Поэтому сравнимость всех приведенных типологических показателей озер вполне приемлема. Согласно лимногенетической классификации выделено 14 типов, 29 подтипов, 64 вида и целый ряд подвидов и разновидностей озер Якутии (табл. 1).

Литература

1. Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Монография. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1962. — 275 с.
2. Россолимо Л.Л. Задачи и установки лимнологии как науки. // Тр. Лимнол. ст. в Косине, 1934, вып. 17, с. 5–20.
3. Россолимо Л.Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования. // Накопление вещества в озерах: сб. науч. трудов. — М., 1964, с. 3–12.
4. Григорьев С.В. О некоторых определениях и показателях в озераведении. // Материалы по гидрологии (лимнологии) Карелии: сб. науч. трудов. — Петрозаводск, 1959, с. 29–46.
5. Богословский Б.Б. Озераведение. Монография. — М.: Изд-во Московского ун-та, 1960.
6. Богданов В.В. Принципы зонального лимнологического районирования. Автореф. докт. дис. — Л., 1970. — 31 с.
7. Дзенс-Литовский А.И. История исследований и освоения соляных озер СССР. // Озера семиаридной зоны СССР: сб. науч. работ. — Л.: Наука, 1970, с. 259–291.
8. Чижик А.К. Рыбоводство в солоноватых прудах: на примере водоемов юга Украины. Монография. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. — 81 с.
9. Вальчик М.А. Линейные формы в рельефе ложа антропогена Минской возвышенности как отражение направления движения древних материковых ледников. // Палеогеография кайнозоя Белоруссии: сб. науч. работ. — Минск, 1989, с. 19–25.
10. Гвоздецкий Н.А. Карстовые ландшафты. Монография. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 112 с.
11. Якушко О.Ф. География озер Белоруссии. Монография. — Минск: Вышэйшая школа, 1967. — 215 с.
12. Якушко О.Ф. Белорусское поозерье. Монография. — Минск: Вышэйшая школа, 1971. — 335 с.
13. Якушко О.Ф. Основы геоморфологии. Учебник для вузов. — Минск: Вышэйшая школа, 1997. — 236 с.

М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, Т.В. Сапелко

ЦИФРОВЫЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАЛЫХ ОЗЕР

М.А. Naumenko, V.V. Guzivaty, T.V. Sapelko

DIGITAL MORPHOMETRIC MODELS OF SMALL LAKES

Статья посвящена методическим аспектам создания морфометрических моделей глубин и уклонов малых озер. На основе натурных измерений современным эхолотом построены цифровые модели с пространственным разрешением 10×10 м четырех озер Нижегородской и Тверской областей. Статистические характеристики распределения глубин и уклонов этих озер впервые рассчитаны на эквидистантной сетке. Обсуждаются преимущества цифровых моделей перед традиционными морфометрическими методами.

Ключевые слова: цифровая модель глубин и уклонов подводного рельефа малых озер, морфометрические характеристики, озера Нижегородской и Тверской областей.

The article is devoted to methodological aspects of creating of morphometric models of depths and slopes of small lakes. Based on field measurements by modern sonar the digital models with spatial resolution of 10×10 m of four lakes Nizhniy Novgorod and Tver regions have created. For the first time the statistical characteristics of the depth and slopes distribution of these lakes calculated on an equidistant grid. It have been discussed the advantages of digital models over traditional morphometric methods.

Key words: digital model of small lake's depth and slope, morphometric characteristics, lakes of Nizhniy Novgorod region and Tver region.

Лимнологические исследования требуют цифрового представления различных форм рельефа водосбора озера и его дна все с большей точностью, причем далеко не всегда цифровые данные (DEM) со спутников с пространственным разрешением 30 м (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.aspa>) позволяют распознать малые озера и определить их площадь в достаточной точностью. Более того, практически невозможно, используя дистанционную информацию напрямую рассчитать объем воды в малом озере и определить основные его морфометрические характеристики рельефа. Малые озера представляют собой наиболее многочисленные формы отрицательного рельефа земной поверхности, заполненные водой. Создание цифровых моделей подводного рельефа малых озер вызывает особый интерес как с методической точки зрения, так и при изучения термического и светового режима, процессов, ответственных за перераспределение грунтообразующего материала и его накопление в различных районах. Форма котловины дает информацию о генезисе озера, во многом определяют пространственную структуру лимнических параметров [2].

Опыт создания цифровой модели малого озера обсуждался ранее в [4]. В настоящей работе представлены несколько цифровых моделей малых озер площадями от

1 до 17 га и проведено обсуждение методических рекомендаций по их созданию и преимуществ цифровых моделей по сравнению с традиционными методами.

Создание цифровых моделей подводного рельефа малых озер должно опираться на точные измерения глубины с достаточно высоким пространственным разрешением. Следует отметить то, что для малых озер подобные исследования проводятся очень редко и морфометрические модели распределения глубин и уклонов выбранных малых озер созданы впервые.

Исходные данные были получены во время специализированных экспедиций на озера летом 2011–2013 гг. (озера Светлояр и Озерское, Нижегородская область) [1] и летом 2012 г. (озера Белое и Черное на острове Хачин озера Селигер, Тверская область), когда были проведены эхолотные измерения глубин. Для измерения глубин был использован эхолот Lowrance с системой определения координат GPS (точность определения глубины до 0,1 м, координат до 5 м). Измерения на озерах проводились с надувной лодки при штилевой погоде в течение одного–двух дней.

Для создания модели подводного рельефа реального озера точки измерения должны выбираться с условием возможно более равномерного покрытия акватории и отражением характерных особенностей расположения глубин.

В табл. 1 приведена характеристика исходных данных, используемых при построении моделей малых озер.

Таблица 1

Характеристика исходных данных и параметры созданных батиметрических моделей малых озер

Озеро	Широта ф. Долгота λ	Дата	Кол-во/плот- ность точек на 100 м ²	Ср. мин. расст., м	Эквив. расст., м	Модель		
						Кол-во узлов	Кол-во точек	ΔZ, м
Светлояр	56,8 45,0	22.08.11	22230/18	0,7	24	50×37	1850	0,13
Белое	57,2 33,0	07.07.12	10650/6	0,6	41	56×56	3136	0,01
Черное	57,2 33,0	09.07.12	46/<1		148	13×14	182	-
Озерское	56,7 45,7	29.08.11 30.06.11	46/<1	0,5	30	55×30	1650	0,05

Плотность покрытия акватории исходными измерениями глубин и степень взаимозависимости между глубинами будет определять принципы интерполирования.

Очевидно, что плотность измерений (Пи) колеблется от одной точки на 100 м² до 18 т./100 м². Эквивалентное расстояние, определяемое как

$$Эр = 100/\text{Пи}^{1/2}$$

превышает среднее минимальное расстояние между измерениями в 35–70 раз. Для озера Светлояр количество измерений избыточно. Наиболее рациональные батиметрические

съемки были проведены на озерах Белом и Озерском, о чем свидетельствуют и минимальные ошибки интерполирования ΔZ .

Перед построением моделей был выполнен анализ исходной эхолокационной информации с целью устранения точек-дублей с противоречивыми значениями глубин. Береговая линия (с нулевыми глубинами) дополнялась незначительным количеством точек выше уреза воды с положительными значениями высот для того, чтобы устранить появление неопределенности в распределении глубин озера при недостаточном количестве измерений в труднодоступных (в основном за счет произрастания высшей водной растительности) определенных участках.

Радиус интерполирования, расстояние на котором необходимо учитывать измерения глубин при расчете глубины в данной точке, для озер Светлояр и Белое, был выбран на основе тестовых вычислений и сравнения площадей и объемов озер при радиусах 50, 100, 200 и 350 м. Радиусы интерполирования были использованы для озера Светлояр — 300 м, для озера Белое — 350 м. Таким образом, можно рекомендовать радиус интерполирования, сравнимый с характерным горизонтальным масштабом водоема.

После преобразования данных и определения условий построения, созданы морфометрические модели озер с помощью программы Surfer в виде карт распределения глубин и трехмерных моделей, которые далее использовались в расчетах и визуализации результатов. При создании морфометрических моделей озер в качестве метода интерполирования был выбран метод Кригинга (Kriging), наиболее употребимый в геостатистике и хорошо зарекомендовавший себя в географических исследованиях. Все модели были построены с одним и тем же горизонтальным размером грида, равным 10 м. Это вполне оправдано, исходя из используемой дискретности измерений и стратегии съемки. Качество интерполирования определяется на основе оценки отклонений исходных точечных значений от результирующей поверхности.

Верификация модели распределения глубин малого озера может быть проведена на основе новых измерений глубин, что не всегда возможно. При достаточно большом количестве проведенных измерений глубины озера один из методов проверки надежности модели может быть основан на создании модели с меньшим количеством данных. Удалив из исходной информации случайным образом небольшое количество измерений (обычно 10 %), строится новая модель. Сравнение двух морфометрических моделей позволит сделать вывод о хорошем (или нет) соответствии между ними, а значит и их надежности. Такой метод верификации был применен при построении модели глубин озера Светлояр.

Цифровые модели позволяют не только провести корректный анализ распределения глубин на эквидистантной сетке, но и оценить трудно определяемую характеристику подводного рельефа дна — уклоны для каждого узла сетки. С помощью программы Surfer впервые рассчитаны уклоны озер Светлояр, Белое, Черное и Озерское, а также построены карты уклонов этих озер. На рис. 1 приведены распределения глубин и уклонов подводного рельефа озера Белое, самого большого из исследованных озер. Безусловно, такие карты предоставляют новые возможности для изучения озер. Подробное цифровое представление глубин в равноотстоящих узлах, а главное, уклонов позволяет без труда устанавливать эмпирические связи между лимническими параметрами и морфометрическими параметрами котловин. Например, видами растительности, уклонами дна, параметрами донных отложений и глубинами дна.

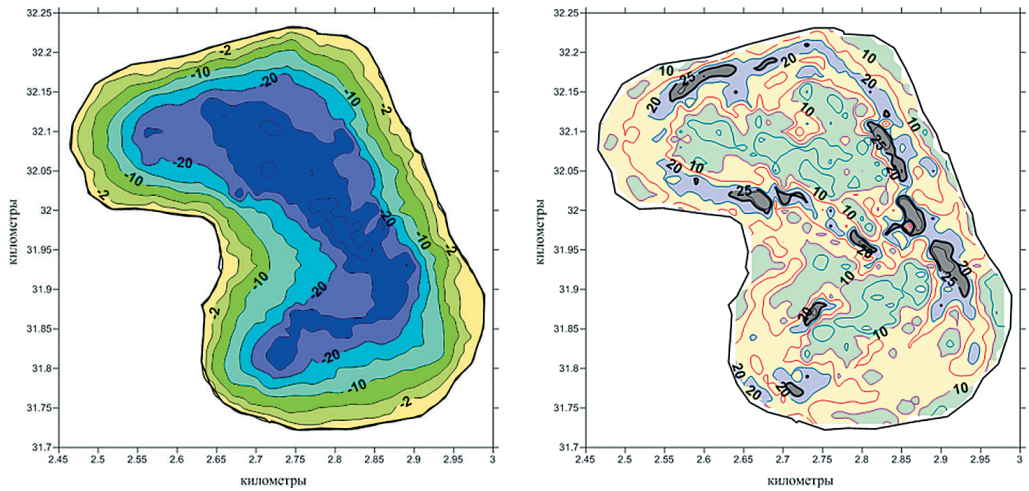


Рис. 1. Батиметрическая карта и карта уклонов озера Белого

Морфометрические модели глубин и уклонов позволили впервые корректно рассчитать основные морфометрические характеристики озерных котловин на эквидистантной сетке и их статистики.

В скобках (табл. 3) приведены средние значения глубин, полученные делением объема на площадь озера.

Таблица 2

Морфометрические параметры исследуемых озер

Морфометрические параметры	оз. Светлояр	оз. Белое	оз. Черное	оз. Озерское
Площадь зеркала, м ²	123234	169919	10136	67457
Объем, 10 ⁶ ×м ³	1,15	2,45	0,07	0,44
Направление главной оси, градусы	5° к востоку от меридиана	50° к западу от меридиана	48° к западу от меридиана	15° к западу от меридиана
Максимальная длина, м	472	591	127	492
Максимальная ширина, м	338	429	106	167
Длина береговой линии, м	1328	1718	362	1211
Изрезанность береговой линии	1,04	1,18	1,01	1,31
Коэффициент емкости	0,29	0,43	0,44	0,34
Коэффициент формы	1,4	1,38	1,2	2,95

Таблица 3

Статистические характеристики глубин и уклонов исследуемых озер

Параметр	оз. Светлояр		оз. Белое		оз. Черное		оз. Озерецкое	
	Глубина, м	Уклон, град	Глубина, м	Уклон, град	Глубина, м	Уклон, град	Глубина, м	Уклон, град
Средняя	9,5(9,3)	9,8	14,6(14,4)	13,6	6,6(6,5)	18,0	6,6	10,1
Медиана	6,7	8,0	14,6	12,9	6,00	18,3	5,7	10,04
Максимум	32,7	32,4	33,7	44,1	15,2	28,6	18,9	24,7
Ср. квадр. откл.	8,15	5,95	9,3	6,71	4,52	4,93	5	5
Коеф. вариации	0,85	0,61	0,64	0,49	0,68	0,27	0,76	0,5
Коеф. асимметрии	0,78	1,17	0,00	0,59	0,27	-0,58	-0,64	0,3
Коеф. эксцесса	0,61	0,87	-1,33	0,56	-1,15	0,42	-0,63	-0,45

Для всех озер были построены батиграфическая (гипсометрическая) и объемная кривые через каждые 0,5 м глубины. Форма котловины чаще всего характеризуется относительной гипсометрической кривой по методу, разработанному Л. Хакансоном [6]. На основе этой кривой строится концепция для сравнения форм котловин. Кривая получается в результате нормирования абсолютных величин по оси абсцисс на площадь озера, а по оси ординат на максимальную глубину. Хакансон предложил принять за среднюю форму котловины озера $f(x)$, форму, описываемую относительной гипсометрической кривой, которая с 50 % вероятностью относит форму к выпуклому или вогнутому классу.

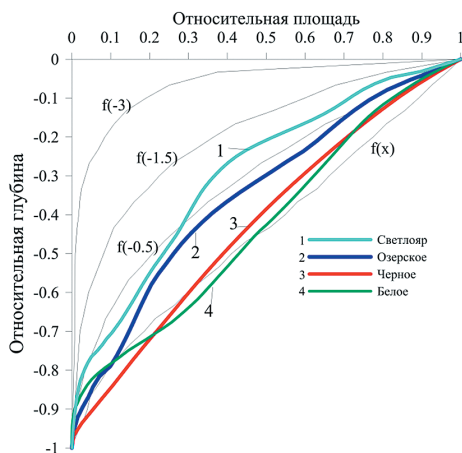


Рис. 2. Относительные гипсометрические кривые исследуемых озер

Статистические отклонения формы, соответствующие +0,5, +1,0, +1,5, +2,0 и +3,0 стандартного отклонения, обозначаются как $f(+0,5)$, $f(+1,0)$ и т.д. Если относительная гипсометрическая кривая лежит между типовыми кривыми $f(-3,0)$ и $f(-1,5)$, то форма котловины относится к очень выпуклому типу, вероятность этой формы составляет 6,5 %. К выпуклому типу относятся котловины, имеющие относительную

гипсометрическую кривую, лежащую между $f(-1,5)$ и $f(-0,5)$. Эта форма встречается с вероятностью 24,2 %. Средняя форма котловины озера имеет слабо выпуклый профиль дна, ее кривая лежит между $f(-0,5)$ и $f(+0,5)$. Эта форма котловины наиболее часто встречается, ее вероятность составляет 38,2 %.

Если относительная гипсометрическая кривая не имеет точек перегиба, Л. Хакансон определяет форму котловины как макротип. Если относительная кривая имеет одну точку перегиба относительно плавной кривой, то форма котловины относится к мезотипу; если точек перегиба несколько — микротипу. На рис. 2 приведены относительные гипсометрические кривые для четырех исследуемых озер. Относительные кривые озера Белое и Черное почти совпадают с кривой $f(x)$ и, следовательно, относятся к слабо выпуклому профилю днамикротипа. Форма котловины озер Светлояр и Озерское относятся к выпуклому типу (микротип), хотя кривая озера Светлояр указывает на более выпуклую форму дна.

Одним из преимуществ использования цифровых моделей с эквидистантной сеткой является возможность построения гистограммы глубин и уклонов, что также детально характеризует форму котловины озера.

С очевидностью выявляется, что два озера — Светлояр и Белое с близким площадями резко отличаются по распределению глубин и уклонов дна (рис. 3). Озеро Белое по объему в 2 раза больше озера Светлояр.

В двадцатом веке морфометрией малых озер в разное время занимались Г.Ю. Верещагин, А.А. Григорьев, С.Д. Муравейский, А.И. Сорокин и др., все исследования в то время проводились на основе топографических карт и традиционных методов измерений глубин. Ярким примером такого подхода является исследование озер острова Хачин, в том числе озера Белое [3].

Исследователями озер предпринимались попытки представить озерную котловину в виде трехмерной геометрической фигуры для расчета ее характеристик аналитически.

Такой подход позволил объединить многие черты водоемов в один тип, но при неизбежной грубой схематизации в значительной мере терялись важные индивидуальные черты водных объектов.

Для подавляющего большинства озер мира их площадь и объем были вычислены планиметрическими методами с использованием крупномасштабных карт. Но это не позволяло определить особенности рельефа. Для малых озер такие вычисления были особенно трудны, так как масштабы топографических карт не позволяют корректно производить эти вычисления. Поэтому создание цифровых моделей котловины малых озер — новое перспективное направление в лимнологии, именно цифровая модель подводного рельефа позволяет провести тщательное изучение рельефа озера.

Первые результаты позволили количественно определить как параметры распределение глубин, так и уклонов малых озер, что несомненно полезно для изучения озерных процессов, зарастания водоемов, организации наблюдений, лимнологической типизации и прогнозирования большинства процессов в озерах. Следует рекомендовать при планировании измерения глубин малого озера, чтобы эквивалентное расстояние составляло 30–40 м.

Значения уклонов изученных озер очень большие по сравнению с уклонами дна, например, Ладожского озера [5]. На склонах с углами более 5° возможны движения по склону, сползание придонных взвешенных веществ [6].

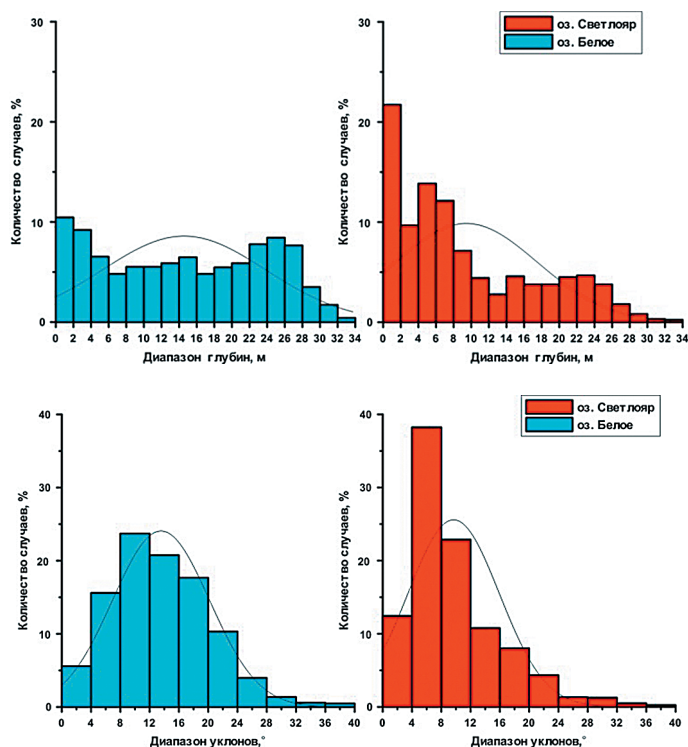


Рис. 3. Гистограммы глубин и уклонов оз. Светлояр и оз. Белое

Цифровые трехмерные моделиозерных котловин важны для изучения генезиса озер и сравнения форм котловин озер, в том числе при выявлении астроблем.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить магистров А.В. Зелионко и З.В. Стрекалову за проведение необходимых вычислений морфометрических характеристик озер.

Литература

1. Баянов Н.Г., Кривдина Т.В. Типология и свойства озер Нижегородского Заволжья. // Изв. РАН. Серия геогр., 2011, № 5, с. 85–96.
2. Догановский А.М. Гидрология суши. — СПб., 2012. — 524 с.
3. Закуленков Л.Д., Назаров А.А. Озера острова Хачин. // Ученые записки Калининского пед. института, 1967, № 44, с. 85–98.
4. Науменко М.А., Зелионко А.В., Стрекалова З.В. Опыт создания цифровой морфометрической модели малого озера на основе высокоточного эхолотирования. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 35–40.
5. Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели. // Изв. РАН. Серия геогр., 2011, № 5, с. 85–96.
6. Håkanson L. A Manual of LakeMorphometry. — Springer-Verlag, 1981. — 80 p.

А.А. Волчек, И.И. Кирвель, П.И. Кирвель

КОЛЕБАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕР БЕЛАРУСИ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

A.A. Volchek, I.I. Kirvel, P.I. Kirvel

VARIATIONS (OSCILLATIONS) OF LAKES WATER BALANCE OF BELARUS IN THE CURRENT CLIMATE CONDITIONS

Проанализированы материалы наблюдений за уровнями воды на 9 озерах Беларуси и за испарением с водной поверхности по 5 метеостанциям за многолетний период. Изложены результаты исследования моделирования временных рядов испарения с поверхности водоемов и уровней воды озер Беларуси с помощью простой и сложной цепей Маркова, построены прогнозные модели, отражающие закономерности колебаний исследуемых параметров.

Ключевые слова: уровень, испарение, модель, вода, баланс, колебания, озера, водоемы.

Materials of observations of water level in 9 Belorussian lakes and of evaporation from water surface according to 5 weather stations were analyzed. Results of modeling of evaporation from water surface and water level time series with the help of simple and complex Markov's model are given. Prognosis models of regularity of studied parameters were developed.

Key words: level, evaporation, model, water, balance, variation (oscillation), lakes, water bodies.

Введение

Озера являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. В Беларуси насчитывается более 10 тыс. озер, с общей площадью водного зеркала около 2000 км² и объем воды 6–7 км³. Они служат накопителями чистой пресной воды, а также выполняют функцию регулирования поверхностных и подземных вод. В связи с тем, что водообмен в озерах замедлен, они более уязвимы, чем реки и могут служить чувствительным индикатором изменений большинства климатических факторов. В последнее время климатические факторы и антропогенные воздействия вызвали трансформацию гидрологического режима озер Беларуси и в ряде случаев существенную. Поэтому появилась необходимость экологического прогноза в условиях изменяющегося климата и антропогенных воздействий на водные объекты, которая ставит перед исследователями ряд конкретных задач по изучению эволюции озерных экосистем, разработке имитационных и прогностических моделей [3].

Целью настоящей работы является анализ временных рядов уровней воды и испарения с водной поверхности озер Беларуси для выявления закономерностей в их колебаниях, количественной оценки трансформации гидрологического режима озерных экосистем.

Исходные материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили данные многолетних инструментальных наблюдений за уровнем воды Гидрометеослужбой на 9 крупнейших озер Беларуси, имеющих большое народнохозяйственное и природоохранное значение, расположенные в Белорусской Позерской и Полесской провинциях. Характеристики озер представлены в табл. 1.

*Таблица 1***Основные географические и морфометрические характеристики
исследованных репрезентативных озер**

Озера	Площадь зеркала, км ²	Объем озера, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Показатель открытости	Показатель глубинности	Коэффициент емкости	Коэффициент удлиненности	Удельный водосбор
Сенно	3,13	26,83	31,5	8,6	0,36	5,90	0,27	3,22	21,69
Лукомское	37,71	249,00	11,5	6,6	5,71	2,11	0,57	2,97	4,75
Нешердо	24,62	84,72	8,1	3,4	7,24	1,18	0,42	5,91	5,81
Освейское	52,80	104,00	7,5	2,0	26,40	0,54	0,27	3,56	3,90
Дривяты	36,14	223,52	12,0	6,1	5,92	1,87	0,51	2,76	11,70
Мястро	13,10	70,10	11,3	5,4	2,43	2,31	0,48	2,60	9,16
Нарочь	79,62	710,00	24,8	8,9	8,95	2,10	0,36	2,06	2,50
Выгонощанское	26,00	32,10	2,3	1,2	21,67	0,41	0,52	1,89	2,35
Червоное	40,82	27,35	2,9	0,7	58,31	0,21	0,24	3,33	4,59

В настоящее время в Беларуси наблюдения за испарением с водной поверхности ведутся на пяти метеостанциях: Василевичи, Полесская, Полоцк, Нарочь и Минск.

Для стационарных процессов практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике формирования исследуемого процесса: плавного возрастания или убывания (монотонный тренд), периодических изменений (циклический тренд), постоянства в течение каких-то периодов времени и резкого изменения при переходе от одного отрезка к другому (ступенчатый тренд). Когда тренд явно не выражен, необходимо рассматривать совместно выборочные автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяются характер изменения годового стока рек. При этом используются критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели приведенные в [4].

Оценка различий в статистических параметрах осуществлялась с помощью критериев Стьюдента и Фишера. Исследование цикличности осуществлялось посредством АКФ и ЧАКФ. Проведение более тонких исследований амплитудно-частотных характеристик процесса потребовало применения спектрально-временного анализа (СВАН). Длина окна выбиралась исходя из требований получения данных о гармониках в наиболее широком частотном диапазоне. В нашем случае величина временного окна принята 11 лет.

Анализ результатов исследований

Анализ среднегодовых уровней воды озер Беларуси свидетельствует о наличии в многолетнем ходе этих значений статистически значимых на 95 %-ном уровне трендов. На рис. 1 приведен хронологический ход, а также линейные и полиномиальные второй степени тренд уровней воды рассматриваемых озер Беларуси. Динамика уровней воды в озерах Беларуси носит сложный и неоднозначный характер. Имеет место глобальный (Освейское, Лукомское, Дривяты, Вилейское, Выгонощанское) и локальный (Сенно) рост уровней воды, на ряде озер наблюдается и снижение уровня воды (Червоное) и достаточно стабильный уровень воды (Нарочь). При этом скорости этих процессов существенно разнятся по территории (табл. 2). В табл. 3 представлены выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов испарения с водной поверхности за период инструментальных наблюдений Беларуси, за период с мая по октябрь.

Таблица 2

Параметры линейных трендов изменения уровней воды озер Беларуси

Озеро	Период	Коэффициенты	
		Скорость изменения, см/ 10 лет	Корреляции
Сенно	1949–2005	–4,8	–0,39
Лукомское	1975–2005	8,4	0,36
Нешердо	1949–2005	9,7	0,67
Освейское	1951–2005	15,9	0,81
Дривяты	1957–2005	8,1	0,53
Мястро	1962–2005	0,85	0,12
Нарочь	1945–2005	–0,15	0,00
Выгонощанское	1965–2005	3,7	0,32
Червоное	1958–2005	–4,2	–0,24

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

Таблица 3

Основные статистические характеристики испарения с водной поверхности на территории Беларуси за период с мая по октябрь

Метеостанции	Расчетный период	Величина испарения, мм	Коэффициенты		
			вариации (Cv)	асимметрии (Cs)	автокорреляции (r 1)
Василевичи	1952–2005	502	0,15	0,42	0,12
Минск	1952–2005	428	0,17	0,61	0,44
Нарочь	1962–2005	407	0,15	0,36	0,43
Полесская	1972–2005	471	0,15	0,33	0,40
Полоцк	1958–2005	394	0,13	1,00	0,15

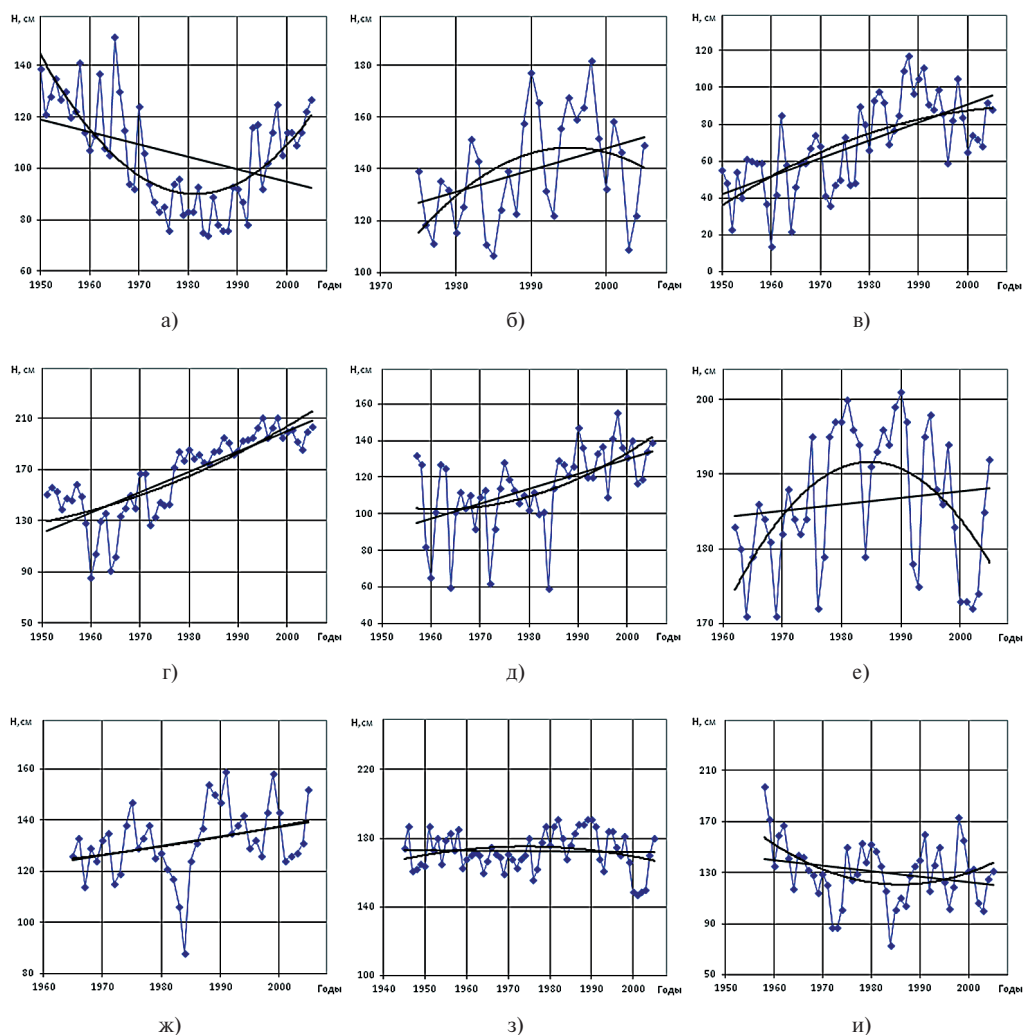


Рис. 1. Хронологический ход среднегодовых уровней воды озер Беларуси:
а — Сенно; *б* — Лукомское; *в* — Нешердо; *г* — Освейское; *д* — Дривяты; *е* — Мястро;
ж — Нарочь; *з* — Выгонощанское; *и* — Червоное

На рис. 2 приведен хронологический ход и линейный тренд величин испарения с водной поверхности за период (май—октябрь) по метеостанциям Беларуси. Как видно из рисунка величина испарения с водной поверхности как правило убывает, но скорости убывания разнятся по территории. Исключение составляет метеостанция Полеская, где наблюдается статистически значимый рост испарения с водной поверхности (табл. 4). Это связано с особенностями ветровой структуры сформировавшийся на территории Беларуси в современных условиях [6].

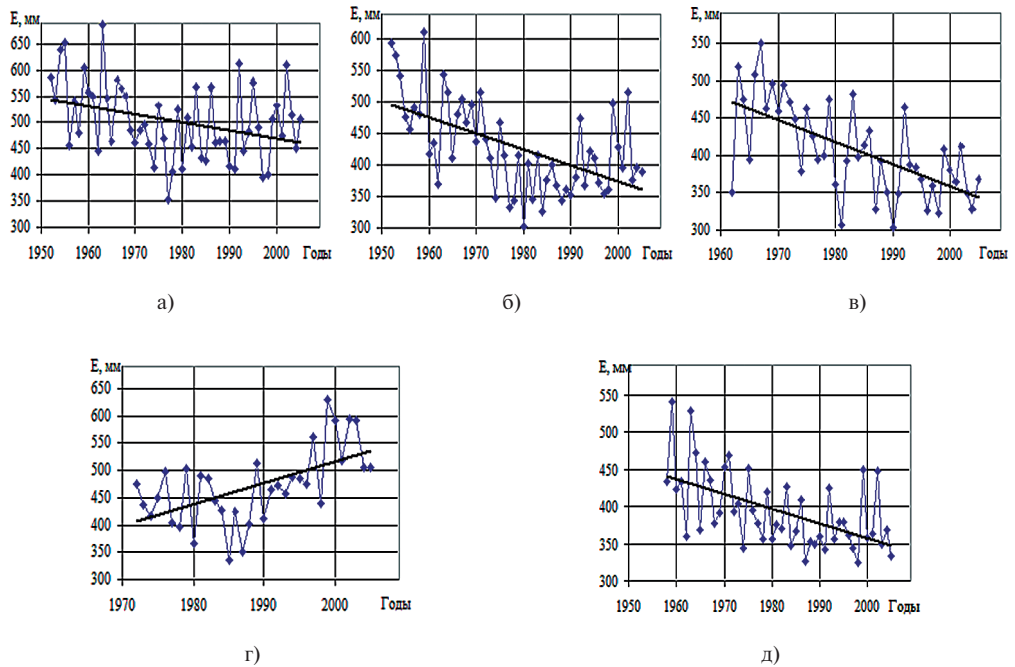


Рис. 2. Хронологический ход испарения с водной поверхности за май–октябрь по метеостанциям: а — Василевичи; б — Минск; в — Нарочь; г — Полесская; д — Полоцк

Таблица 4

Градиенты (α , мм/10 лет) изменения испарения с водной поверхности и коэффициенты корреляции линейных трендов (r) по метеостанциям Беларуси

Период осреднения	Метеостанции									
	Василевичи		Минск		Шарковщина		Нарочь		Полоцк	
	α	r	α	r	α	r	α	r	α	r
май	–3,348	–0,31	–1,094	–0,11	–5,084	–0,31	–0,741	–0,05	–2,443	–0,23
июнь	–6,559	–0,40	–8,575	–0,59	–7,266	–0,40	–11,99	–0,62	–8,113	–0,57
июль	–6,741	–0,38	–9,617	–0,52	–0,695	–0,03	–9,552	–0,50	–5,345	–0,40
август	–1,913	–0,13	–5,101	–0,40	–2,581	–0,14	–6,084	–0,37	–3,033	–0,30
сентябрь	–2,515	–0,29	–4,460	–0,53	–5,271	–0,34	–4,212	–0,44	–2,321	–0,39
октябрь	–0,369	–0,10	–2,003	–0,49	–0,596	–0,12	0,190	0,05	–1,318	–0,40
май–октябрь	–21,45	–0,42	–30,85	–0,61	–21,49	–0,33	–32,39	–0,61	–22,57	–0,57

Примечание. Выделены статистически незначимые коэффициенты корреляции.

Изменения интенсивности испарения с водной поверхности вызваны главным образом изменениями скорости ветра и в меньшей степени притоком суммарной солнечной радиации.

Сравнительный анализ изменения испарения с водной поверхности на территории Беларуси показал, что произошли заметные изменения. В целом величина испарения с водной поверхности увеличилась и в большей степени эти изменения коснулись северной части Беларуси. Кроме того, увеличилась пространственная неоднородность испарения с водной поверхности. О наличии существенных изменений в пространственной и временной структуре испарения с водной поверхности подтверждаются и материалами наблюдений на испарительных бассейнах.

Характер поведения факторов определяющих испарение с водной поверхности детально рассмотрен нами в работах [2, 5].

Анализ однородности временных рядов

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к среднегодовым уровням воды и испарения с водной поверхности озер Беларуси за период инструментальных наблюдений. При этом исследуемый временной ряд разбивался на два интервала: с начала наблюдений по 1985 г. включительно и с 1986 г. (начало роста среднегодовых температур воздуха) по 2005 г. Для оценки различий в статистических параметрах использованы критерии Стьюдента (оценка выборочных средних) и Фишера (оценка выборочных дисперсий). В табл. 5 приведены основные статистические параметры для этих интервалов, а также результаты статистической проверки на однородность [1]. Выборочные оценки статистических параметров временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси за период инструментальных наблюдений опубликованы нами в работе [2]. Статистически значимые различия установлены для озер Лукомское, Нещердо, Освейское, Дривяты, Вилейское и Выгонощанское, статистически значимые коэффициенты вариации выявлены только для двух озер: Освейское и Дривяты. Что касается коэффициентов автокорреляции, то статистически значимые различия наблюдаются только для озера Нарочь. Это обусловлено как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла.

Таблица 5

Основные статистические параметры испарения с водной поверхности на территории Беларуси за период с мая по октябрь

Метеостанции	Расчетные периоды. годы	Величина испарения, мм	Коэффициенты	
			вариации	автокорреляции
Василевичи	1952–1985 / 1986–2005	509/489	0,15/0,13	0,19/–0,03
Минск	1952–1985 / 1986–2005	446/398	0,18/0,12	0,46/0,02
Нарочь	1962–1985 / 1986–2005	438/369	0,14/0,11	0,21/–0,07
Полесская	1972–1985 / 1986–2005	438/494	0,12/0,15	–0,27/0,43
Полоцк	1958–1985 / 1986–2005	412/369	0,13/0,10	0,06/–0,32

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

Стационарность процесса многолетних уровней воды озер имеет место для отдельных озер. При анализе закономерностей многолетних колебаний уровней воды озер использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических (табл. 6).

Таблица 6

**Основные статистические параметры уровней воды озер Беларуси
для различных периодов осреднения**

Озеро	Период	Средние уровни, см	Коэффициенты		
			вариации	асимметрии	автокорреляции
Сенно	1949–1985	108	0,20	0,14	0,72
	1986–2005	103	0,17	–0,33	0,67
	1949–2005	106	0,19	0,13	0,71
Лукомское	1975–1985	126	0,12	0,27	0,18
	1986–2005	147	0,14	–0,14	0,38
	1975–2005	140	0,15	0,21	0,50
Нещердо	1949–1985	58	0,35	0,05	0,49
	1986–2005	89	0,18	–0,09	0,48
	1949–2005	69	0,35	–0,09	0,69
Освейское	1951–1985	148	0,18	–0,57	0,76
	1986–2005	196	0,04	0,15	0,41
	1951–2005	165	0,19	–0,64	0,88
Дривяты	1957–1985	103	0,20	–0,97	0,08
	1986–2005	131	0,09	0,11	0,08
	1957–2005	114	0,19	–0,91	0,45
Мястро	1962–1985	185	0,05	0,03	0,45
	1986–2005	187	0,05	–0,37	0,62
	1962–2005	186	0,05	–0,13	0,55
Нарочь	1945–1985	172	0,05	0,34	0,21
	1986–2005	173	0,09	–0,60	0,74
	1945–2005	173	0,06	–0,26	0,52
Выгонощан- ское	1965–1985	125	0,10	–1,11	0,39
	1986–2005	139	0,08	0,38	0,37
	1965–2005	132	0,10	–0,45	0,55
Червоное	1958–1985	132	0,21	–0,04	0,62
	1986–2005	129	0,16	0,48	0,31
	1958–2005	131	0,18	0,13	0,53

Примечание. Выделены статистически значимые различия между величинами.

В результате анализа выборочных средних величин испарения с водной поверхности, коэффициентов вариации и автокорреляции по метеостанциям Беларуси статистически значимые различия установлены практически по всем месяцам и метеостанциям, что свидетельствует об изменении климатических условий за последние 15–20 лет.

Анализ цикличности временных рядов

Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний уровне воды озер необходимо рассматривать концепцию цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза уровня режима озер заключается в их апериодичности, так как фаза, амплитуда и длительность цикла меняются без видимых закономерностей. Кроме того, пока нет единого мнения о природе этих циклов: отсутствует объективная методика выделения и анализа циклов уровней воды озер. Считается, что циклы обусловлены либо влиянием внешних (космофизических факторов), либо автоколебательными процессами в системе атмосфера-гидросфера Земли, либо естественными свойствами любой случайной последовательности.

Как было показано в работе [2], по характеру изменения АКФ среднегодовых уровней воды озер Беларуси их можно разделить на две группы. Для первой группы озер (Лукомское, Дриваты, Мястро, Нарочь, Выгонощанское, Червоное) характерно наличие статистически значимых значений коэффициентов корреляции при $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы за редким исключением. Для другой группы озер (Сенно, Нещердо, Освейское) характерно наличие статистически значимых коэффициентов корреляции, величины которых постепенно убывают с увеличением сдвижки во времени.

Для временных рядов испарения с водной поверхности озер Беларуси АКФ и ЧАКФ имеют сложный характер. Для всех метеостанций характерен явно выраженная статистически выраженная корреляция при сдвиге $\tau = 3$ и $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и характеризуются как правило положительными значениями [5].

Анализ СВАН-диаграмм временных рядов среднегодовых уровней воды озер Беларуси показал преобладание в этих рядах 4 и 11-летних циклов, хотя и имеют место 5 и 6 летние циклы [5], а в рядах испарения с водной поверхности по метеостанции Василевичи [5] для периода осреднения май–октябрь преобладающим является 6-летний цикл (1959–1985 гг.), возможно выделение еще двух циклов 3 (1985–1993 гг.) и 12 (1959–1985 гг.).

Построение прогнозных моделей

При совместном рассмотрении АКФ и ЧАКФ данного процесса, с помощью которых определяется характер изменения среднегодовых уровней воды, использовались критерии оценки степени нестационарности процесса и выбор модели осуществлялся с учетом рекомендаций приведенных в [4].

АКФ экспоненциально затухает, а ЧАКФ имеют значительную величину при $\tau = 1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и

характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений. Следовательно, рассматриваемый процесс колебаний уровней воды озер может быть идентифицирован авторегрессионной моделью.

Результаты проведенных исследований закономерностей многолетних колебаний среднегодовых уровней воды озер Беларуси позволяют считать установленным наличием определенной связи уровней смежных лет. Это служит основанием для описания среднегодовых уровней воды озера в виде простой цепи Маркова. Нами предпринята попытка описать колебания уровней воды озер помощью сложной модели Маркова со сдвигом до 11 лет. На основании анализа цикличности во временных рядах с помощью АКФ и ЧАКФ удалось построить ряд прогнозных моделей позволяющих дать оценку динамики процесса с заблаговременностью в 1 год. Результаты регрессионно-корреляционного анализа представлены в [2]. В качестве примера приведена модель колебания уровня воды оз. Освейское:

$$H(t+1) = 19,5 + 0,831 \cdot H(t) - 0,369 \cdot H(t-1) + 0,441 \cdot H(t-2), R = 0,93.$$

Аналогичные модели получены и для испарения с водной поверхности [1]. Полученные модели отражают закономерности колебаний уровней воды озер и испарения с водной поверхности озер Беларуси могут использоваться для краткосрочного прогноза.

Заключение

Анализ временных рядов уровней воды и испарения с водной поверхности озер Беларуси за период инструментальных наблюдений выявил наличие статистически значимых изменений в динамике среднегодовых величин для отдельных озер Беларуси, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. Происходящие процессы разнятся как по территории, так и по направленности и скорости самих процессов. Межгодовые изменения в колебаниях уровней воды озер и испарения с водной поверхности вызваны главным образом изменениями скорости ветра и в меньшей степени притоком суммарной солнечной радиации.

При анализе закономерностей многолетних колебаний рассматриваемых характеристик использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса изучаемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических. Показана возможность построения прогнозных моделей с заблаговременностью в один год.

Поставленная проблема требует всесторонних дальнейших исследований, так как изменение уровня режима озер и испарения с водной поверхности потребует пересмотра нормативов при проектировании водохозяйственных объектов и разработки компенсационных мероприятий. Вся сложность построения прогнозных моделей заключается в их индивидуальности, наличия большого объема исходной информации и невозможности оперативной оценки полученных результатов.

Литература

1. Волчек А.А., Кирвель П.И. Прогнозирование колебаний испарения с водной поверхности водоемов Беларуси. // Вестн. БГУ. Сер. 2, 2008, №2, с. 86–93.
2. Волчек А.А. Пространственно-временные колебания уровней воды озер Беларуси в условиях изменяющегося климата. // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника, 2008, № 2(50), с. 27–37.
3. Догановский А.М. Закономерности колебаний уровней озер и их влияние на основные элементы режима водоемов. // Труды 5 Всесоюзного гидрологического съезда, т. 8. — Л., 1990. — 65 с.
4. Исмайлов Г.Х., Федоров В.М. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги. // Вод. ресурсы, 2001, т. 28, № 5, с. 517–525.
5. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии. // География и природные ресурсы, 2005, № 2, с. 137–144.
6. Volchak A., Kirvel I. A Lake water level variations in Belarus. // Limnological Review (2013) 13, 2, p. 115–126.

Э.А. Турсунов, А.С. Мадибеков, К.М. Кулебаев

СОВРЕМЕННЫЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗ. БАЛКАШ

I.A. Tursunov, A.S. Madibekov, K.M. Kulebaev

PRESENT MORPHOMETRICAL PARAMETERS OF BALKHASH LAKE

Представлены результаты батиметрической съемки, проведенные лабораторией «Гидрология водоемов» Института географии в период 2011–2013 гг. по акватории озера Балкаш, проведен сравнительный анализ картометрических характеристик.

Ключевые слова: озеро Балкаш, батиметрия, морфометрические характеристики, батиграфическая и объемная кривые.

To produce results of bathymetrical survey activity from laboratory of reservoir hydrology during the period 2011–2013. Balkhash lake, also activity with comparative analysis map capability.

Key words: Balkhash lake, bathymetria, morphometrical parameters, bathygraphical and volumetric curve.

Озеро Балкаш — крупный бессточный водоем Казахстана, расположенный на стыке Центрального и Юго-Восточного регионов республики. При отметке уровня воды 341,41 м (по состоянию на 01.01.2000) его длина составляет 614 км, средняя ширина до 30 км, средняя глубина — 5,8 м. Площадь водосбора 413 тыс. км², из них 113 тыс. км² или более 27 % приходится на территорию Синцзян-Уйгурского Автономного Района (СУАР) КНР [1].

Озеро Балкаш разделено полуостровом Узынарал примерно на равные части: Западную — мелководную, почти пресную, проточную и широкую часть (глубина 3–11 м) и Восточную — так же мелководную, бессточную, соленую и узкую часть, где особо выделяется самый древний и глубокий Бурлютобинский плес (рис. 1).

Котловина озера состоит из нескольких маленьких впадин. В западной части имеются две впадины глубиной до 7–11 м, — одна из которых, протянулась с западного побережья от острова Тасарал до мыса Коржынтубек, вторая на юге от залива Бертыс, при этом являясь самым глубоким местом западной части Балкаша. Глубина впадины восточного Балкаша достигает 16 м при этом, наибольшая глубина всей восточной части, измеренная в 2011 г. составила 23,5 м, средняя глубина всего озера составила 5,8 м.

Западные, а также северные берега озера — высокие (до 20–30 м) и скалистые, сложены палеозойскими породами (порфиры, туфы, граниты, сланцы, известняки) они имеют следы древних террас. Южные берега от залива Карашаган до дельты реки Иле низкие (до 1–2 м), песчаные, периодически затапливаются высокой водой (из-за чего испещрены многочисленными мелкими озерами), местами встречаются прибрежные холмы высотой 5–10 м [1]. Береговая линия очень извилиста, расчленена многочисленными заливами и бухтами. Крупными заливами западной части являются: Сарышаган,

Кашкентениз, Каракамыс, Шемпек (южная конечность озера), Балакашкан и Ахметсу. В восточной части выделяют заливы: Гузколь, Балыктыколь, Кукун и Карашаган, там же расположены полуострова Байгабыл, Балай, Шаукар, Кентубек и Коржынтобе.



Рис. 1. Вид оз. Балкаш из Космоса

- 1 — Полуостров Сарýесик, разделяющий озеро на две части, и пролив Узынарал;
2 — Полуостров Байгабыл; 3 — Полуостров Балай; 4 — Полуостров Шаукар; 5 — Полуостров Кентубек;
6 — Острова Басарал и Ортаарал; 7 — Остров Тасарал; 8 — Залив Шемпек; 9 — Залив Сарýшаган

Больших островов на озере мало, Басарал и Тасарал (наиболее крупные), а также Ортаарал, Аякарал и Олжабеккарал расположены в западной части озера. В восточной части находятся острова Узынарал, Ултаракты и Коржын, а также остров Алгазы. Всего на озере насчитывалось 43 острова общей площадью 66 км², однако со снижением уровня воды образуются новые острова, а площадь уже существующих увеличивается. При уменьшении уровня воды в озере происходит отчленение многочисленных заливчиков, что существенно сказывается на площади зеркала.

Первые гидрометрические работы на озере относятся к началу XX в. Они были организованы гидрометрической частью отдела улучшений при министерстве земледелия в 1910 г. Гидрографические обследования котловины оз. Балкаш выполнены в 1943–1944 гг. гидрографической партией Управления гидрометслужбы Казахской ССР. В 1960–1963 гг. сектором географии АН КазССР (ныне Институт географии РК) проводились батиметрические съемки котловины, изучение их морфометрии и динамики берегов [1, 2].

В 1970 г. гидропроектом, а также в 1977 г. с поправками Чистяевой С.П. были уточнены морфометрические кривые озера Балкаш [3]. В 1984–1985 гг., кафедрой гидрологии суши КазНУ им. аль-Фараби (быв. КазГУ им. С. Кирова) были организованы экспедиционные работы для уточнения батиметрической карты озера Балкаш [4]. Далее

эти исследования, вместе с группой ученых исполнителей были продолжены в Институте географии РК. Авторы статьи являются непосредственными участниками этих работ. Исследования оз. Балкаш в 1984–1985 гг. проводились с судна «Гариф Мусин», являющимся рыболовецким траулером длиной 17,5 м, шириной 4 м и с осадкой 1,8 м, что не позволяло производить измерение глубин прибрежной мелководной части озера. Местоположение точек измерения определялись путем штурманской прокладки. По результатам работ была построена батиметрическая карта оз. Балкаш масштаба 1:200 000.

В период с 2011 по 2013 г. Институтом географии РК были выполнены исследовательские работы на оз. Балкаш по уточнению современных морфометрических характеристик, с применением каютного катера Quicksilver 640 с малой осадкой, что позволяет производить исследования на мелководье, в исследованиях применялось современное оборудование фирмы Lowrance HDS-10, с возможностями акустического эхолотирования с привязкой к GPS-системе.

Общая протяженность маршрутов батиметрической съемки за 3 года составила более 13000 км. В измеренные эхолотом значения вводились поправки на глубину погружения датчика эхолота, а также данные были приведены к значению уровня воды 342,5 м абс. По результатам исследований построена батиметрическая карта масштаба 1:500000 оз. Балкаш с использованием программного продукта ArcGIS, который позволяет визуализировать (представить в виде цифровой карты) большие объемы статистической информации, имеющей географическую привязку (рис. 2). Аналогичная цифровая батиметрическая модель Ладожского озера создана в 1993 г. [7].

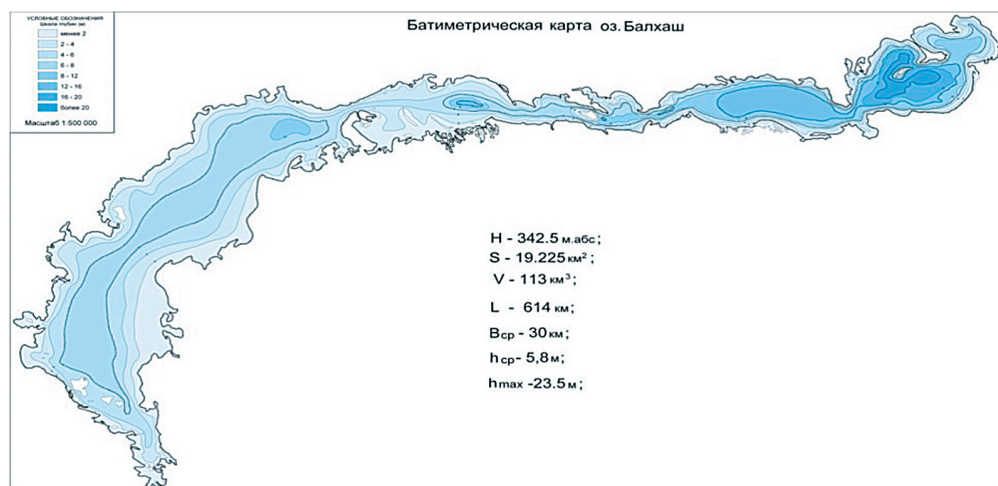


Рис. 2. оз. Балкаш в изобатах по результатам батиметрической съемки 2011–2013 гг.

Основные картометрические характеристики оз. Балкаш представлены в таблице. При уровне воды 342,5 м абс., площадь зеркала составляет 19225 км², а объем воды в озере 113 км³. Максимально измеренная глубина озера на Бурлютобинском плесе составила 23,5 м.

Батиметрическая съемка 2011–2013 гг. показала, что значения глубины озера на середине отличается малой изменчивостью. Изменение глубин происходит в большинстве случаев на расстоянии менее одного км от уреза берега. Кроме того в прибрежной части озера наблюдается большое количество подвижных песчаных гряд, подверженных влиянию ветровой деятельности [4].

Таблица 1

Картометрические характеристики оз. Балкаш

<i>H</i> (м абс.)	<i>S</i> (км ²)	<i>V</i> (км ³)
342,5	19225	113
341,3	17391	93,3
339,3	13085	78,1
337,2	9863	52
335,2	6265	32,2
333,2	2630	19,7
329,2	1591	9,2
325,2	598	2,83

Примечание. *H* — отметка уровня воды в озере (м абс.); *S* — площадь зеркала (км²); *V* — объем воды в озере (км³).

Сравнивая результаты батиметрической съемки 2011–2013 гг. с исследованиями, выполненными в 1984 г. можно отметить, что произошли незначительные изменения очертания берегов за счет зарастания камышом и последующим образованием песчаных баров в мелководных частях озера. Довольно значительно изменились морфометрические характеристики протоки Узынарал. Таким образом, если в 1984 г. наблюдались незначительные заросли камыша по берегам, четко прослеживался урез воды, а свободная поверхность протоки составляла в ширину около 8 км, при максимальных глубинах до 2 м, то по результатам съемки 2012 г., ширина протоки свободная от зарослей камыша составила 1,25 км, при этом максимальные глубины протоки достигали 7 м. Всего в протоке Узынарал были выполнены измерения на 4 разрезах в 2012 г., и 3 разрезах в 2013 г. На разрезе в самой восточной части протоки в начале ее расширения в подводном рельефе четко прослеживается три подводных рукава, что говорит об образовавшейся здесь подводной дельте. В 1984 г. в протоке проводились измерения скорости и направления течения воды, они определялись в основном скоростями и направлением ветра. По результатам наблюдений 2011–2013 гг. можно предположить, что основным фактором перетока воды с западной части в восточную, является величина подпора воды [5, 6]. На рис. 3 представлены батиграфическая и объемная кривые оз. Балкаш, построенные по результатам современной батиметрической съемки.

Таким образом, выявлены зависимости кривых до отметки в 344 м абс., в которых прирост объема воды в озере и площади его зеркала осуществляется в результате заполнения глубоководного Бурлютобинского плеса в восточной части озера. При дальнейшем увеличении уровня воды происходит заполнение более мелководных плесов Восточного Балкаша, а после отметки 335,5 м абс и мелководной Западной части озера.

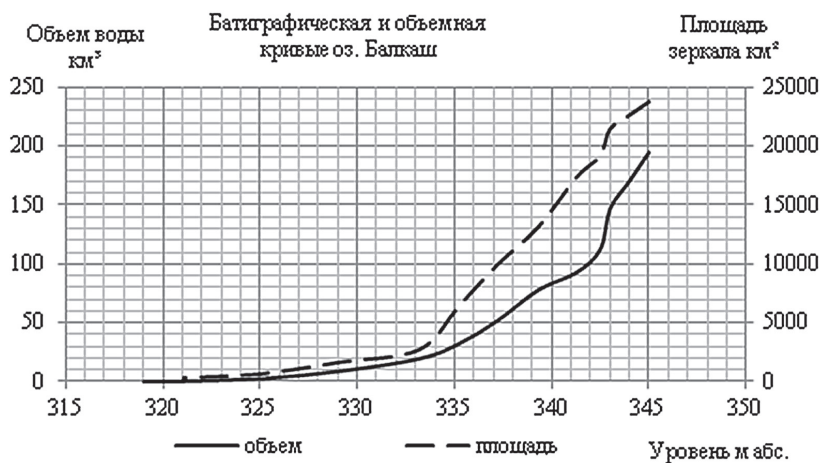


Рис. 3. Батиметрическая и объемная кривые оз. Балхаш

Системный подход к изучению и оценке морфометрических характеристик с использованием современного оборудования позволяет не только достоверно и объективно оценить степень их изменений со временем, но и обосновать комплекс мероприятий, определить виды и объемы работ по детальному уточнению морфометрических характеристик котловины озера в более крупном масштабе с детализацией отдельных бухт, заливов. В частности можно отметить о необходимости дополнительных инструментальных измерений скоростей и направлений течения воды при различных скоростях и направлении ветра. Построение прогнозных зависимостей для определения минимальной разницы между уровнем воды в Западной и Восточной части озера, при которой будет осуществляться переток воды, обеспечивающий сохранение его гидрохимического баланса, который является необходимым условием устойчивости его экосистемы [5].

Литература

1. Атлас Казахской ССР. Том 1. Природные условия и ресурсы. — М., 1982.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 13, вып. 2. — Л.: Гидрометеиздат, 1970.
3. Чистяева С.П. К вопросу о практическом применении методики расчета распределения минерализации воды по акватории водоемов к озеру Балхаш. // Тр. КазНИГМИ, 1977, вып. 58.
4. Бабкин В.А., Колыванов Л.Л. Уточнение морфометрических характеристик озера Балхаш. // Вопросы гидрологии орошаемых земель Казахстана. Сборник научных статей. — Алма-Ата, 1986, с. 144–149.
5. Догановский А.М., Малинин В.Н. Гидросфера Земли. — СПб.: Гидрометиздат, 2004. — 630 с.
6. Проблемы гидроэкологической устойчивости в бассейне озера Балхаш. Под ред. А.Б. Самаковой. — Алматы: «Каганат», 2003. — 127 с.
7. Sorokin A.I., Naumenko M.A., Veselova M.F. New morphometrical data of Lake Ladoga. Hydrobiologia, 1996, vol. 322, p. 65–67.

**Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова, А.П. Георгиев, Т.В. Ефремова,
Н.И. Пальшин**

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР СЕВЕРА
ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

**N.N. Filatov, L.A. Rukhovets, L.E. Nazarova, A.P. Georgiev, T.V. Ephraim,
N.I. Pal'shin**

**CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE ECOSYSTEM OF LAKE NORTH OF
EUROPEAN RUSSIA**

Изучены особенности воздействия изменений климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России (Восточной Фенноскандии).

Ключевые слова: Озера, климат, биота, экосистемы, измерения, моделирование.

The features of the climate change impact to the ecosystems of lakes located in a fairly strong anthropogenic influence on the example of the lakes of the North European part of Russia.

Key words: Lakes, climate, biota, ecosystems, measuring, modeling.

Материалы и методы исследований

Использованы данные наблюдений на метеорологических станциях (МС) Росгидромета за последние 100 лет, а также сведения о гидрологическом и химико-биологическом режимах более, чем по 60 озерам Севера ЕТР, при этом для анализа использовались данные, имеющие наибольшую длительность наблюдений, порядка 60 лет, [8] (рис. 1). Выполнен вероятностный анализ данных рядов гидрометеорологических наблюдений, элементов водного баланса, гидрологических и химико-биологических параметров озер для изучения их изменчивости во временных масштабах от десятков лет до внутригодовых колебаний.

Для оценки реакции Ладожского и Онежского озер кроме данных измерений использовались разработанные коллективом авторов СПб ЭМИ РАН [1, 15, 27] 3-х мерные математические модели, в основе которых лежат методы геофизической гидродинамики, численные методы решения уравнений в частных производных, методы анализа водных экологических систем.

Исследованию влияния климата на гидрологический режим и биоту озер Карело-Кольского региона большое внимание уделялось многими исследователями. Отметим ряд работ А.М. Догановского [6, 7], А.М. Догановского и Н.В. Мякишевой [5].

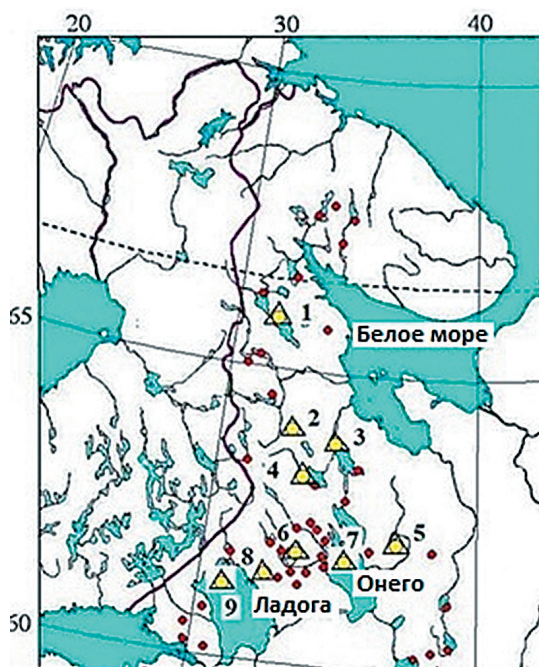


Рис. 1. Схема расположения исследованных озер: Озера показаны точками. Треугольником с кружком показаны озера, для которых имеются наиболее длительные наблюдения вплоть до 2011 г.

1 — Топозеро; 2 — Ругозеро; 3 — Выгозеро; 4 — Сегозеро; 5 — Водлозеро; 6 — Сямозеро;
7 — Онежское; 8 — Тулмозеро; 9 — Ладожское

Изменения климата Севера Европейской территории России по данным инструментальных измерений

По данным анализа гидрометеорологических наблюдений на Севере ЕТР в течение XX и первого десятилетия XXI в. отмечается положительная тенденция изменения средней годовой температуры воздуха. Начиная с 1988 г. значения средней годовой температуры воздуха превышали климатическую норму, рассчитанную за 1961–1990 гг., практически во все годы [12, 19]. Интенсивность повышения температуры воздуха на Севере ЕТР постепенно возрастает по мере продвижения от высоких широт к более низким. Коэффициенты линейных трендов за период 1951–2011 гг. составляют 0,20–0,34°С/10 лет для территории Карелии, около 0,30°С/10 лет на территории Кольского полуострова. Выявлены квазициклические колебания метеопараметров с различными временными масштабами (около 60, 30, 11, 5 и 2 лет).

Результаты анализа данных показывают, что во внутригодовом ходе изменение средних месячных значений температуры воздуха происходит неравномерно для разных сезонов года и неоднородно для исследуемого региона. Общим является то, что наиболее интенсивное потепление отмечается в марте (+0,45 ... +0,6°С/10 лет) на всех

станциях исследуемой территории. В течение 1951–2011 гг. наблюдается рост годовых сумм осадков. Заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов.

Влияние изменения климата на гидрологический режим озер

Уровень воды. Особый интерес вызывают процессы в экосистемах крупнейших озер Европы, и в частности колебания уровня воды, элементов водного баланса, которые отражают происходящие климатические изменения. В колебаниях уровня воды Ладожского и Онежского озер по данным с 1881 по 2011 г. нет заметного тренда, отмечаются квазипериодические колебания, маловодные и многоводные годы (рис. 2).

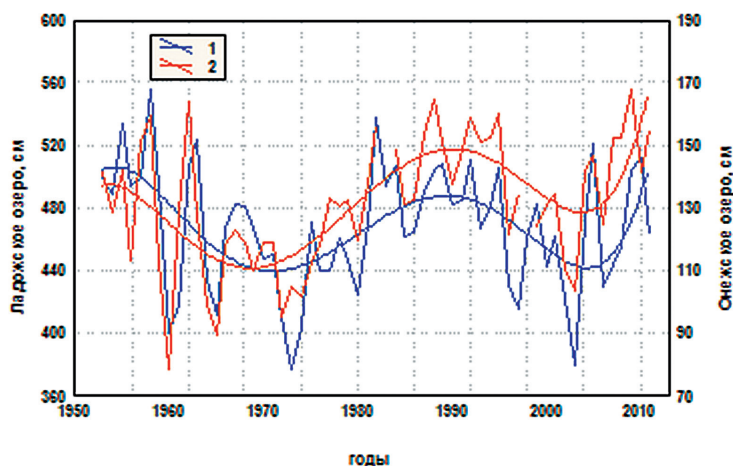


Рис. 2. Основные тенденции изменений уровня (в см) крупнейших озер Европы: Ладожского (1) и Онежского (2) (1953–2011 гг.). Полиномиальное сглаживание

По спектрам колебаний уровня озер можно выделить составляющие с временными масштабами порядка 60, 30 и 6–7 лет.

Температура воды. По данным измерений в последнее десятилетие XX — первое десятилетие XXI в. отмечается повышение средней годовой температуры поверхности воды (ТПВ) Великих озер Европы. За 60-летний период коэффициенты линейных трендов средней ТПВ за теплый период года (июнь–октябрь) в других озерах Севера ЕТР изменялись от 0,21 до 0,29°C/10 лет, возрастая в крупных и глубоких озерах и по мере продвижения с севера на юг региона. Межгодовая изменчивость средних декадных значений ТПВ у берега во всех озерах в период летнего прогрева была больше 10°C, а сроков перехода температуры воды через фиксированные значения (4 и 10°C) больше 30 суток. Наименьшие изменения в термическом режиме озер в течение 60-летнего периода происходили в северных озерах. Даты перехода ТПВ через 10°C, которое определяют как «*биологическое лето*», на всех исследуемых озерах в течение 60-летнего периода весной сдвигались к более ранним срокам на 1,4–1,7 сут/10 лет, а осенью к более поздним срокам на 1,0–2,3 сут/10 лет.

Заметные тренды ТПВ за разные периоды XX столетия наблюдались не только в озерах Севера ЕТР, но и центральной России [Груза и др., 2008], Европы [28], Северной Америки [24]. В озере Байкал за период 1896–2005 гг. по данным гидрологического поста Листвянка также происходил рост средней ТПВ в мае–сентябре с трендом $0,085^{\circ}\text{C}/10$ лет [20].

Ледовый режим. В работе [25] для Ладожского озера показано, что по данным за 1956–2003 гг. ледовый покров в последние годы устанавливается на 1–6 дней позднее, а время вскрытия озера ото льда наступает раньше на 14 дней. Для Онежского озера отмечается такая же тенденция [16]. Продолжительность безледоставного периода на Онежском озере возросла в среднем от 215 дней за год в конце XIX в. до 227 дней в среднем за год в настоящее время.

За последние 10 лет продолжительность периода ледостава на озерах разных размеров Севера ЕТР сократилась в среднем на 11–16 суток, по сравнению со средними значениями за весь 60-летний период. Линейные тренды ледовой фенологии для 8 озер Севера ЕТР за период с 1950 по 2011 г. показывают за 60-летний период заметную тенденцию к более поздним срокам установления льда на 2–12 суток и ранним срокам окончания ледостава на 2–8 суток [8].

Для крупных озер Севера России — Ладожского, Онежского, Таймыр, для озера Байкал, также отмечена тенденция к более ранним срокам разрушения ледового покрова и уменьшению продолжительности ледостава [2].

Для большинства озер Северной Америки, Европы и Азии показано, что ледостав на озерах стал начинаться позднее, в среднем $6,3$ дней/100 лет; разрушение раньше, в среднем $5,8$ дней/100 лет; продолжительность существования ледяного покрова снизилась в среднем на 12 дней/100 лет [24, 26, 28, 29].

Сценарии изменения климата в регионе для оценки термогидродинамики озер. Для задания потока тепла и суммарного притока воды в озеро в условиях возможного изменения климата на водосборе Онежского озера использовались результаты прогнозистических расчетов до 2050 г. с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (модель ЕСНАМ-4) при различных сценариях изменения концентрации CO_2 и других парниковых газов в атмосфере [3, 11, 19, 27].

Изменения полей течений и температуры воды. При моделировании течений, циркуляция вод озер (система течений), соответствующих средним многолетним за период порядка внешнего водообмена была названа *климатической циркуляцией* [15]. Циркуляция вод озера, при построении которой тепловой поток задавался на основе максимальных значений, названа *теплой*. Для теплового потока, определенного по минимальным значениям удельного — *холодной* и условно соответствовала значениям при похолодании климата. При потеплении климата заметны существенные изменения полей ТПВ. На поверхности Онежского озера в июне месяце нет 4 градусной изотермы, характеризующей термобар. При потеплении до 2°C гомотермия в озерах в весенний период исчезает на 10 дней раньше, термобар формируется на 20 дней раньше; смещаются сроки образования ледового покрова. Онежское озеро полностью покрывается льдом в первой половине февраля, тогда как для климатической (среднемноголетней) циркуляции это явление наблюдается в конце декабря — начале января; при потеплении климата уменьшается площадь ледяного покрова, в результате чего скорости течений

в зимний период в озерах возрастают за счет дополнительного воздействия поля ветра. Такой тип циркуляции вод в зимний период является типичным для американских Великих озер, расположенных в более теплом климате, чем Ладожское и Онежское озера.

Реакция рыбной части сообщества озер на изменение климата

Изменения температуры воды на рыбную часть сообщества может проявляться как прямо (влияние на инкубацию икры, выживаемость личинок, определяет границы ареалов распространения различных видов и пр.), так и опосредованно, через изменение условий для роста и развития различных видов, в том числе конкурентных преимуществ отдельных видов в условиях их обитания. Исследовалось влияние изменения климатических условий на численность и видовой состав ихтиофауны на основе данных по уловам рыб в разнотипных озерах Севера ЕТР. Для анализа выбраны наиболее эксплуатируемые по объему добычи рыбы в регионе водоемы, по которым имеются репрезентативные ряды наблюдений: Ладожское, Онежское, Выгозеро, Сямозеро и Водлозеро (рис. 1), существенно различающиеся по термогидродинамическому режиму, трофическому статусу и продуктивности. Выделены агрегированные группы *осенненерестовых* видов рыб (сиг, лосось, паля, форель) и *весенненерестовых* (семейство карповых и окуневых). Для сравнения были использованы не абсолютные значения уловов, а изменение их структуры по удельному весу видов рыб (процент от общего объема вылова в данном озере), отражающих ихтиофауну озер.

По температурному предпочтению ихтиофауну озер региона можно разделить на три группы рыб: *холодноводные* (сиги, ряпушка, корюшка, хариус, налим), относительно *тепловодные* весенненерестовые (синец, густера, лещ, судак), и *фоновые* или *эвритермные* (щука, плотва, язь, окунь, ерш и др.), которые мало восприимчивы к температурным изменениям окружающей среды. Были изучены продолжительность «биологического лета», изменения удельного веса в уловах холодноводных и тепловодных видов рыб в исследуемых озерах (рис. 3).

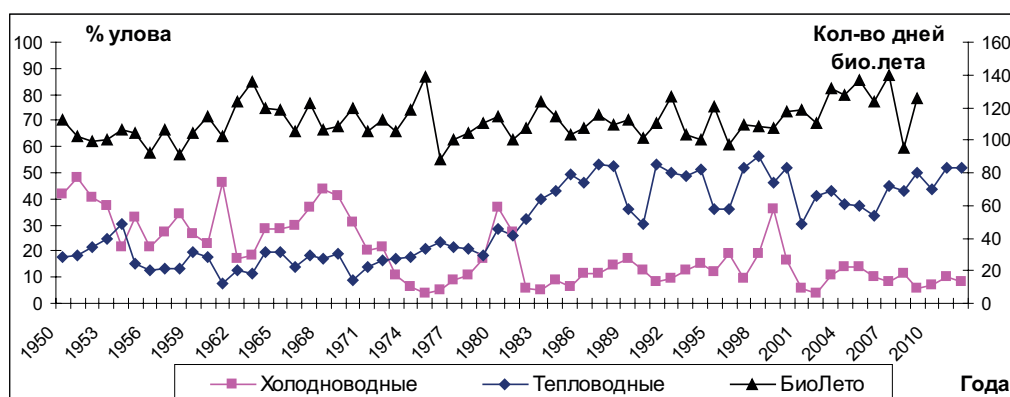


Рис. 3. Динамика продолжительности «биологического лета» и удельного веса (% общего улова) тепловодных и холодноводных видов в оз. Водлозеро (1950–2012 гг.)

Продолжительность «биологического лета» за 60 лет увеличилась в озерах в северной части региона на 10–14 суток (рис. 3), а в крупных и средних мета- и гипотермических озерах центральной и южной части региона на 17–24 суток. С увеличением числа дней «биологического лета» при потеплении климата на Севере ЕТР роль тепловодных рыб в уловах возрастает, а холодноводных — уменьшается (рис. 3). Для крупного и глубоководного водоема процессы трансформации ихтиофауны под влиянием климатических факторов проходят медленнее, чем в мелководных водоемах. Велика роль в изменениях ихтиофауны и происходящих экономических преобразованиях. За последние 50 лет заметно увеличение доли вылова теплолюбивых видов в относительно крупных озерах и на востоке региона, в Архангельской области: Кенозеро, Лекшмозеро [4].

На основании исследований отметим, что для более крупных озер процессы трансформации ихтиофауны происходят медленнее.

В работе Шуттера и др. [30] для озер Европы и Северной Америки было показано, что уменьшение продолжительности существования ледяного покрова и изменения термического режима непосредственно влияет на рыбопродуктивность и смертность рыб. Потепление климата приводит к сокращению числа холоднолюбивых видов. Быстрые климатические изменения последних 30 лет сокращают срок адаптации этих видов к новым условиям, а теплолюбивые виды получают преимущество для развития.

Современные изменения климата и возможное его потепление на Севере ЕТР на 1–3°C до 2050 г. может негативно отразиться на рыбном сообществе озер Севера ЕТР, когда холоднолюбивые виды, такие как лосось, сиг и др., замещаются более теплолюбивыми, такими как окунь, плотва и др., что наблюдается также и при эвтрофировании и закислении озер при антропогенном воздействии.

Реакции озерных экосистем на изменения климата и антропогенной нагрузки по результатам моделирования

Комплекс математических моделей экосистем для Ладожского и Онежского озера [1, 15], основанных на результатах многолетних исследований, был использован для воспроизведения основных особенностей круглогодичного функционирования экосистем этих озер. Расчеты показали, что модель экосистемы Онежского озера адекватно воспроизводит круглогодичное функционирование экосистемы, по крайней мере, с точки зрения годовой динамики обобщенной сырой массы фитопланктона. Темпы развития фитопланктона в Онежском озере, если рассматривать биомассу, существенно уступают таковым в Ладожском. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что климатические воздействия лишь незначительно влияют на функционирование экосистемы озер: изменения в развитии фитопланктона значимы только в осенний период, а зоопланктона — более заметны. Можно сделать вывод, что климатические воздействия лишь несколько усиливают или ослабляют роль современных изменений биогенной нагрузки. В то же время отметим, что по данным моделирования при дальнейшем потеплении климата в Великих озерах Европы возможно снижение биомассы фитопланктона, особенно в осенний период, так как водоросль *Aulacosira islandica*, которая дает главный вклад в биомассу фитопланктона и развивается только при температуре воды, не превышающей 6°C.

Работа выполнена при поддержке гранта № 14-17-00740.

Литература

1. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Под ред. Л.А. Руховца. — СПб.: Наука, 2003. — 364 с.
2. Водные ресурсы России и их использование. Ред. И.А. Шикломанов. — СПб., 2008. — 598 с.
3. Голицын Г.С., Ефимова Л.К., Мохов И.И. и др. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI вв. // Изв. РГО, 2002, т. 134, вып. 6, с. 36–47.
4. Дворянкин Г.А. Экологическая характеристика рыбной части сообщества Кенозерского национального парка и биология основных промысловых видов рыб. // Сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. — Архангельск, 2011, с. 131–147.
5. Догановский А.М., Мякишева Н.В. Уровень Ладожского озера в различных диапазонах частот. Под ред. Н.Н. Филатова. — Петрозаводск, 2000, с. 352–358.
6. Догановский А.М. Многолетние колебания уровня Ладожского озера. // Современные проблемы в гидрометеорологии. — СПб., 2006, с. 175–183.
7. Догановский А.М. Уровненный режим озер — интегральный показатель климатических и экологических изменений. // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana), 2007, № 1.
8. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Сроки ледовых явлений на водоемах Северо-Запада России. // Метеорология и гидрология, 2011, № 8, с. 89–98.
9. Кудерский Л.А. Состав и промысловое значение рыбного населения Ладожского озера. // Рыбохозяйственное исследование больших озер Северо-Запада европейской части России: Сборник научных трудов, вып. 334. — СПб., 2009, с. 138–214.
10. Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. Под ред. В.А. Румянцев и В.Г. Драбковой. — СПб.: Наука, 2002. — 327 с.
11. Меляшко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Малевский-Малевич С.П., Надежина Е.Д., Спорышев П.В. Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии. // Метеорология и гидрология, 2004, № 7, с. 5–26.
12. Назарова Л.Е. Особенности динамики температурного режима Карелии. // География и природные ресурсы, № 4, 2012.
13. Онежское озеро. Атлас. Отв. ред. Н.Н. Филатов. — Петрозаводск: Кар.НЦ РАН, 2010. — 151 с.
14. Петрова Л.П., Кудерский Л.А. Водлозеро: природа, рыбы, рыбный промысел. — Петрозаводск, 2006. — 196 с.
15. Руховец Л.А., Петрова Н.А., Менишуткин В.В., Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Полосков В.Н., Петрова Т.Н., Сусарева О.М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки. // Водные ресурсы, 2011, т. 38, № 6, с. 740–752.
16. Сало Ю.А., Назарова Л.Е. Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера под влиянием изменений климата. // Известия Русского географического общества, 2011, т. 143, № 3, с. 50–54.
17. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. — Л.: Наука, 1982. — 232 с.
18. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. — СПб.: Наука, 1991. — 200 с.
19. Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И., Руховец Л.А., Толстиков А.В., Шаров А.Н. Реакция озер Восточной Финляндии и Восточной Антарктиды на изменения климата. // Доклады Академии наук, 444, № 5, 2012, с. 554–557.
20. Шимараев М.Н. О влиянии Северо-Атлантического колебания (NAO) на ледово-термические процессы на Байкале. // Доклады Академии наук, 2008, 423, № 3, с. 397–400.
21. Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Striale D., Donk E.V., Weyhenmeyer G.A., Winder M. Lakes as sentinels of climate change. // Limnol. Oceanogr., 2009, 54 (6, part 2), p. 283–297.
22. Assel R.A., Robertson D.M. Changes in winter air temperatures near Lake-Michigan, 1851–1993, as determined from regional lake-ice records. // Limnol. Oceanogr., 1995, 40, p. 165–176.
23. Dibike Y., Prowse T., Saloranta T., Ahmed R. Response of Northern Hemisphere lake-ice cover and lake-water thermal structure patterns to a changing climate. // Article first published online: 11 APR 2011. DOI: 10.1002/

- hyp.8068. Hydrological Processes. Special Issue: Canadian Geophysical Union — Hydrology Section, vol. 25, Issue 19, p. 2942–2953, 15 September 2011.
24. *Jensen O.P., Benson B.J., Magnuson J.J., Card V.M., Futter M.N., Soranno P.A., Stewart K.M.* Spatial analysis of ice phenology trends across the Laurentian Great Lakes region during a recent warming period. // *Limnol. Oceanogr.*, 2007, 52, p. 2013–2026.
25. *Karetnikov S., Naumenko M.* Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years. // *Hydrol. Process.* Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8048. 2011.
26. *Korhonen J.* Long-term changes in lake ice cover in Finland. // *Nordic Hydrology*, 2006, 37, p. 347–363.
27. *Ladoga and Onego — Great European Lakes: Modeling and Experiment.* Rukhovets L., Filatov N., (Eds.). — London, Springer-Praxis, 2010. — 302 p.
28. *Livingstone D.M., Adrian R., Blenchner T., George G., Weyhwenmeyer G.A.* Lake ice phenology. The impact of Climate Change on European Lakes. — Springer, 2009. — 507 p.
29. *Magnuson J.J.* History and heroes: the thermal niche of fishes and long-term lake ice dynamics. // *J Fish. Biol.*, 2010, 77, p. 1731–1744.
30. *Shuter B., Helland I. P., Zweimü I., Hölker F.* The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. // *Aquatic Sciences*. 08/2012; DOI:10.1007/s00027-012-0274-3.

В.А. Земцов, Д.А. Вершинин, А.Л. Дубцов, А.С. Тарасов

**ВЛИЯНИЕ УРАБАНИЗАЦИИ НА ДЕГРАДАЦИЮ ОЗЕР И РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ЕЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БЕЛОЕ В ЧЕРТЕ
Г. ТОМСКА)**

V.A. Zemtsov, D.A. Vershinin, A.L. Dubtsov, A.S. Tarasov

**INFLUENCE OF URBANIZATION ON DEGRADATION OF LAKES AND
RECOMMENDATIONS FOR ITS PREVENTION (THE WHITE LAKE
IN THE CITY OF TOMSK AS A CASE STUDY)**

Показано, как озеро за несколько столетий полностью изменилось под влиянием антропогенных факторов. Определены морфометрические характеристики озера. Дана оценка водного баланса озера в прежнем и в современном состоянии. Предложены рекомендации для предотвращения дальнейшей деградации озера и направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Белое озеро, Томск, морфометрические показатели, водный баланс, антропогенные воздействия.

It is shown how the lake has been completely changed under the influence of anthropogenic factors during some last centuries. The morphometric parameters of the lake have been determined. An estimation of the water balance of the lake in the former and present state is presented. Recommendations to prevent ongoing degradation of the lake and directions for further research have been proposed.

Key words: White Lake, the city of Tomsk, morphometric parameters, water balance, anthropogenic influences.

Работа по исследованию исторического водного объекта в г. Томске — оз. Белого проводилась кафедрой гидрологии Томского государственного университета с целью определения его происхождения, морфометрических характеристик и водного баланса для планирования мероприятий по предотвращению дальнейшей деградации озерной экосистемы. В статье излагаются результаты этой работы.

Физико-географические условия и история озера

Белое озеро расположено на территории г. Томска. Климат в его бассейне континентально-циклонический. Средняя годовая температура воздуха составляет — 0,5°С, годовые осадки — около 600 мм [4].

Оз. Белое находится в бассейне р. Ушайка, правого притока р. Томь. Это один из самых крупных водоемов на поверхности междуречной равнины в черте города. Котловина водоема предположительно имеет провальное происхождение [5]. Посреди водоема находился остров (по-видимому, сложенный органическим грунтом). Раньше оз. Белое питалось подземными водами, на его песчаном дне били ключи. Из него вытекала речка Белая, впадавшая в р. Ушайка, о чем свидетельствуют архивные источники.

К настоящему времени котловина сильно изменена искусственным путем: изначально прямоугольная, она стала почти идеально круглой (рис. 1, 2). Ложе водоема сейчас блюдцеобразное, рельеф дна ровный.

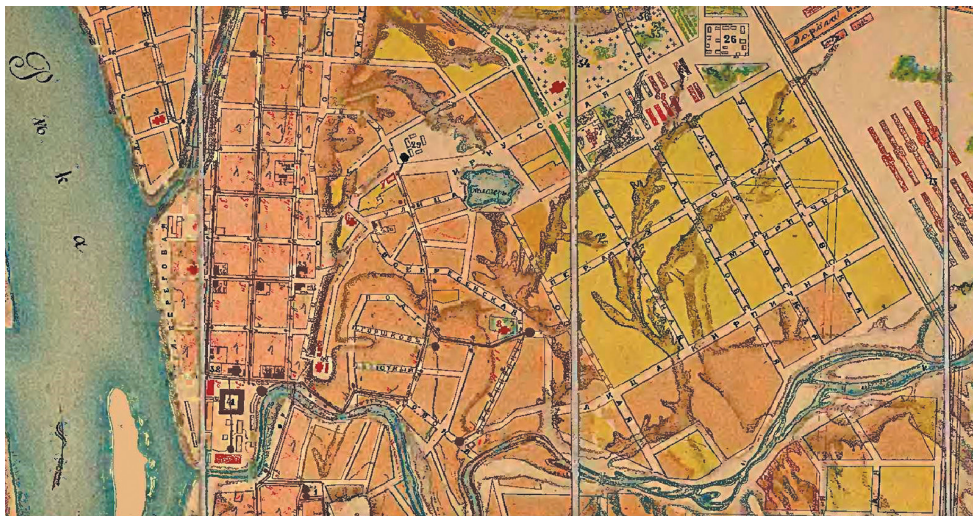


Рис. 1. Фрагмент плана г. Томска 1872 г.

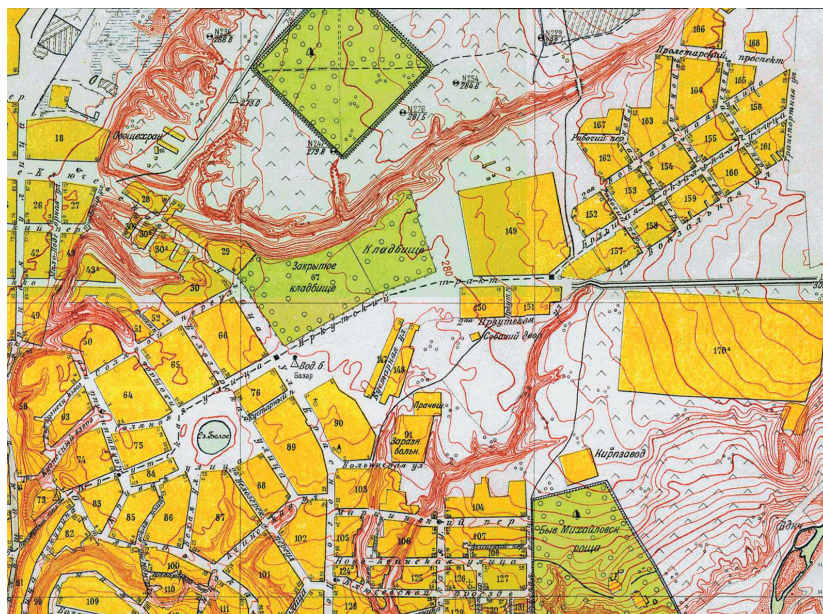


Рис. 2. План окрестностей Белого озера 1933 г.

Согласно материалам дореволюционной печати [2], с давних пор Белое озеро находилось в середине большой площади, окруженной с четырех сторон домами. Со временем вокруг него появились постоянные дворы, усадьбы извозопромышленников, доставлявших товары из Томска в Иркутск и обратно по Иркутскому тракту. Лед на оз. Белое ежегодно покрывался слоем навоза, весной попадавшим в воду. Еще в последней трети XVIII в. извозопромышленники выпустили воду из водоема, углубили его котловину, придали ей округлую форму, убрали торфяной остров и окружили водоем торфяным валом. Оз. Белое использовалось в противопожарных целях.

После прокладки железной дороги извозный промысел пришел в упадок. В водоем сбрасывалось большое количество бытовых стоков, что определило его антисанитарное состояние. В начале XX в. даже обсуждался вопрос о засыпке озера. В 1908 г. благодаря усилиям городской управы водоем был приведен в порядок, вокруг него высажены деревья.

Во время Великой отечественной войны оз. Белое использовалось как технический водоем. Березовая роща вокруг него была спилена на дрова. В 1970-е гг. его дно было снова очищено. Естественные родники, питавшие озеро подземными водами, забетонированы. Вода (по свидетельствам местных жителей) в результате стала затопливать подвалы окружающих домов. Вода в водоеме стала грязной и мутной, прибрежная территория постепенно замусоривалась. В последние десятилетия оз. Белое было в плохом санитарно-экологическом состоянии. Ситуацию удалось улучшить к 400-летию Томска. В результате полуторалетних работ была полностью заменена ливневая канализация, выполнено благоустройство аллей, набережная и дорожки вымощены плиткой. Территория вокруг водного объекта была оборудована для отдыха томичей. Оз. Белое вновь стало любимым местом отдыха горожан. И летом, и зимой здесь многолюдно. Сюда приходят порыбачить, покататься на катамаранах, посидеть в кафе на берегу, посетить с детьми аттракционы, послушать музыку, прокатиться на лошади, просто погулять, отдохнуть, посмотреть на воду [2].

Морфометрические показатели

Для построения плана водного объекта в изобатах и горизонталях в масштабе 1:2000 с сечением изолиний 0,5 м выполнены промеры глубин по продольным профилям с судна, расстояние между галсами 15–20 м. Расстояния между промерными точками на галсе — 5–15 м. Координирование промеров осуществлялось при помощи GPS-приемника. Наблюдения за уровнем воды выполнялись путем нивелирования горизонта воды перед началом промерных работ и их завершению. Отметка горизонта воды во время производства работ составила 110,1 м Балтийской системы высот (БС).

Площадь бассейна озера в настоящее время ограничена бордюром асфальтированной дорожки вокруг озера и составляет 16740 м².

К основным морфометрическим показателям относятся: длина, ширина, изрезанность береговой линии, площадь зеркала, объем воды, средняя и максимальная глубина, форма котловины [1, с. 484]. Длина озера (L) равна 155 м, средняя ширина (B) — 96 м. Длина береговой линии (l_0) на момент измерений составила 446 м. Изрезанность береговой линии определена как отношение длины береговой линии к длине

окружности круга, площадь которого равна площади озера (412 м), $m = 1,08$. Такое малое значение m свидетельствует и слабой, почти не выраженной изрезанности.

Площадь поверхности (зеркала) $A_{\text{оз}}$ на момент проведения промеров составила 13540 м². При максимальном уровне заполнения озера (УВВ) 111,4 м БС она составляет 15610 м². Объем воды в озере $V_{\text{оз}}$ на момент проведения промеров глубин эхолотом (16.10.2013), соответствующий отметке 110,1 м БС, равен 23 490 м³, при УВВ — 42 360 м³. Максимальная глубина (H_{max}) озера соответственно равна 4,2 и 5,5 м, а средняя глубина — 1,86 и 2,7 м. Коэффициент формы котловины Φ незначительно увеличивается с ростом уровня с 0,44 на момент измерений до 0,49 при максимальном заполнении. Средний уклон дна водоема (‰) составляет 0,086. Коэффициент глубинности b равен 0,078.

Кривые изменения площади и объема с глубиной в относительных единицах приведены на рис. 3.

Судя по формам кривых можно сделать вывод, что в глубинной части ($0,5 H_{\text{max}}$) котловина имеет форму конуса, и переходит к поверхности в форму полуэллипсоида. В целом оз. Белое можно классифицировать как мелководное по глубине и очень малое по площади.

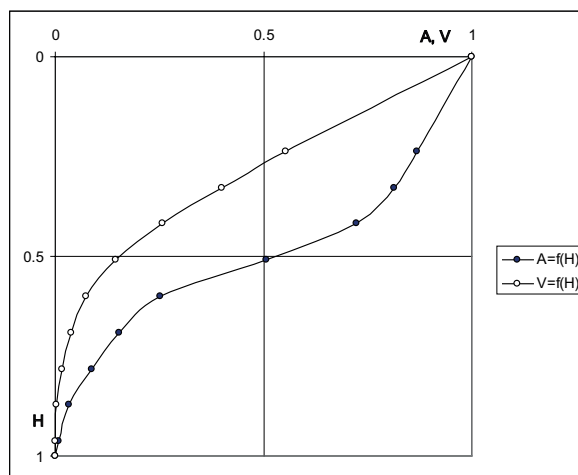


Рис. 3. Батиграфическая и объемная кривые котловины оз. Белое.
 H — глубина; A — площадь; V — объем озера (все в долях от значений, соответствующих УВВ)

Оценка водного баланса озера

Водный баланс — соотношение за какой-либо промежуток времени прихода, расхода и аккумуляции (изменение запаса) воды для речного бассейна, участка территории или водного объекта. В общем случае учету подлежат атмосферные осадки, конденсация влаги, горизонтальный перенос и отложение снега, поверхностный и подземный приток, испарение, поверхностный и подземный сток, изменение запаса влаги в почво-грунтах и др.

В отдельных частных случаях нет необходимости в детальном учете всех составляющих баланса. Техническим средством анализа воднобалансовых соотношений является уравнение водного баланса [6].

Уравнение водного баланса оз. Белое (при отсутствии поверхностного стока из него в несуществующую уже в течение длительного времени р. Белая) можно записать для среднего года при условии нулевого баланса и устойчивости состояния водоема, когда запасы воды в нем в среднем за год не меняются, следующим образом:

$$10^{-3} (P - E_{\text{вп}}) A_{\text{оз}} + 10^{-3} (P - E_{\text{с}}) A_{\text{всб}} + W_{\text{подз1}} - W_{\text{подз2}} = 0, \quad (1)$$

где P — норма годовых атмосферных осадки за год, мм; $E_{\text{с}}$ — норма годового испарения с поверхности суши, мм; $E_{\text{вп}}$ — норма годового испарения с водной поверхности, мм; $A_{\text{оз}}$ и $A_{\text{всб}}$ — соответственно площадь водного зеркала водоема и его водосбора, м²; $W_{\text{подз1}}$ и $W_{\text{подз2}}$ — соответственно приход подземных вод и сток из него, м³.

Предположим, что климатические показатели, определяющие величину осадков и испарения, а также площадь зеркала водоема в среднем несущественно изменились за многолетний период.

По данным Гидрометеослужбы РФ [4], средние многолетние годовые осадки с поправками на смачивание осадкомерного сосуда составляют на метеостанции Томск 591 мм. По другим данным средние за многолетний период годовые осадки на метеостанции Томск, исправленные на все виды недоучета, оцениваются в 557 мм [5], что несколько меньше приведенных в вышеуказанном справочнике. Последние цифры принимаем в расчет, так как они самой расчетной схемой метода ГКР В.С. Мезенцева наилучшим образом увязаны с другими элементами водного и теплового баланса.

Норма годового испарения с поверхности водосбора, по гидролого-климатическим расчетам, проведенным для метеостанции Томск, равна 447 мм [3], а норма годового испарения с водной поверхности, вычисленная нами согласно [6] на основе карты изолиний (680 мм/год) и поправочных коэффициентов, учитывающих глубину водоема, степень защищенности его от ветра и площадь зеркала, оценивается в 525 мм.

Средняя за год площадь водоема $\bar{A}_{\text{оз}}$ составляет, по нашим измерениям, примерно $(13540 + 15610)/2 = 14575$ (м²), учитывая ее значения при минимальной отметке и при уровне высоких вод (последние определены по меткам высоких вод на берегах водоема).

Площадь водосбора водоема $A_{\text{всб}}$ раньше, когда вокруг него существовала малоэтажная деревянная застройка при отсутствии канализации, согласно нашим измерениям по карте 1933 г., оценивается в 542000 м².

После того, как эта застройка была заменена на многоэтажную каменную застройку, улицы заасфальтированы, проведены централизованное водоснабжение и канализация, вокруг водоема устроены бордюры, величина его площади, согласно нашим измерениям по карте м-ба 1:2000 1988 г. издания, сократилась до 16740 м², т.е. более чем в 32 раза.

Разность $(W_{\text{подз2}} - W_{\text{подз1}})$ содержит в себе, кроме характеристик подземного водообмена, также невязку водного баланса. Рассчитываем эту разность по формуле (1) для прежних, близких к естественным, условиям питания водоема (наличие достаточно большой водосборной площади и проч.):

$$W_{\text{подз2}} - W_{\text{подз1}} = 10^{-3}(557 - 525)14575 + 10^{-3}(557 - 447)542000 = \\ = 466 + 59620 = 60086 \text{ м}^3,$$

Это значит, что для сохранения равновесных условий отток из водоема должен превышать приток в него подземным путем. Разница соответствует 1,9 л/с среднегодового стока из озера, или 108 мм слоя воды, распределенного по всей площади водосбора ($A_{\text{оз}} + A_{\text{всб}} = 556575 \text{ м}^2$), и превосходит ошибку определения, например, слоя осадков. Этот сток частично мог осуществляться поверхностным путем достаточно постепенно и распределялся неравномерно по сезонам года. Таким образом, водоем мог питать небольшую речку даже при отсутствии подземного питания. Учитывая же, что озеро имело еще и родниковое питание, разгрузка воды из него (не важно, подземным или поверхностным путем) составляла достаточно заметную величину. Об этом свидетельствует и наличие в рельефе русла реки Белая, а также эрозионной ложбины к северо-западу от озера, которые хорошо просматриваются на карте 1872 г. (рис. 1).

Проведя аналогичный расчет для современных условий с меньшей площадью водосбора, получаем:

$$W_{\text{подз2}} - W_{\text{подз1}} = 10^{-3}(557 - 525)14575 + 10^{-3}(557 - 447)16740 + 0 = \\ = 466,4 + 1841,4 = 2307,8 \text{ м}^3,$$

или 0,007 л/с со слоем стока воды с суммарной площади водосбора ($A_{\text{оз}} + A_{\text{всб}} = 31315 \text{ м}^2$), равным 74 мм. Эта величина в единицах слоя воды довольно велика, но соизмерима с ошибкой подсчета водного баланса и в объемном выражении очень мала, так как невелика и оставшаяся площадь водосбора (в 32 раза меньше первоначальной).

При ненулевом балансе возникает вопрос о наличии подземного водообмена. К настоящему времени водоем утратил естественные источники подземного питания, его котловина, по-видимому, изолирована от водоносных горизонтов и озеро питается только за счет атмосферных осадков. Гидравлическая связь озерных вод с подземными водами нарушена, родники на дне озера прекратили свое существование в результате техногенного воздействия.

Скважина, пробуренная в ноябре 2013 г. в озерной котловине на расстоянии 6 м от береговой линии водоема, до глубины 2,0 м от земной поверхности (отметка поверхности скважины 110,9 м), не вскрыла горизонты грунтовых вод, что говорит об отсутствии гидравлической связи вод оз. Белое с подземными в течение, как минимум, большей части года.

Таким образом, при отсутствии подземного питания водоема и стока из него положительный, но близкий к нулю баланс (соизмеримый с погрешностями расчета при отсутствии материалов фактических наблюдений) свидетельствует о том, что оз. Белое в настоящее время существует в критических условиях.

Тот же факт, что сейчас для поддержания уровней воды в водоеме требуется его искусственная подпитка, свидетельствует о том, что имеется подземная разгрузка водной массы, особенно при превышении уровня воды в озере уровней подземных вод на окружающей его территории, т.е. отрицательный баланс подземного питания.

В разные годы (в том числе в 2013 г.) озеро искусственно пополнялось, но официальные документированные сведения об объемах подпитки отсутствуют. Сведения о пополнении водоема примерно на 7000 м³ в год имеются лишь из средств массовой информации <http://www.tv2.tomsk.ru/news/lbeloe-ozero-popolnyayut-lvodoi>.

Следует подчеркнуть, что расчет водного баланса проведен при отсутствии данных натурных наблюдений за его составляющими непосредственно на исследуемом участке. Более точно его можно оценить только на основе инструментальных наблюдений в самом водоеме и на его водосборной площади, как минимум, в течение года и, в частности, более точно определить уровень подземных вод в бассейне и степень гидравлической связи вод водоема и подземных вод с учетом их сезонной и межгодовой изменчивости.

Рекомендации по поддержанию водности водного объекта и предотвращению его деградации

Для поддержания водности оз. Белое и предотвращения его деградации можно рекомендовать следующее:

1. Дополнительная подкачка воды из внешних источников. Объем воды и сроки подкачки следует определять в зависимости от количества осадков и их распределения внутри года с таким расчетом, чтобы фактический уровень воды соответствовал отметке уровня высоких вод.
2. Уборка водосборной площади водоема и прилегающей территории от мусора.
3. Заселение озера водными организмами, в том числе водной растительностью, способствующими прекращению деградации водоема и улучшению качества воды в нем.
4. Проведение мероприятий по поддержанию содержания кислорода в воде в зимний заморный период путем создания искусственных прорубей, бурения лунок во льду. Возможный дефицит кислорода в теплый период, связанный с разложением растительности и органики, поступающей со стоками, может быть предотвращен путем искусственной аэрации воды.

Литература

1. *Догановский А.М., Малинин В.Н.* Гидросфера Земли. Под ред. Л.Н. Карлина. — СПб.: Гидрометеоиздт, 2004. — 630 с.
2. *Жеравина А.Н.* Томск второй половины XIX — начала XX в. (по материалам дореволюционной печати). Под ред. В.П. Зиновьева. — Томск: изд-во Том. ун-та, 2010. — 402 с.
3. *Карнацевич И.В., Мезенцева О.В., Тусупбеков Ж.А., Бикбулатова Г.Г.* Возобновляемые ресурсы тепло-энергообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик. — Омск: изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. — 268 с.
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1—6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. — СПб.: Гидрометеоиздт, 1993. — 717 с.
5. *Парначев В.П., Парначев С.В.* Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска: Материалы к полевой геологической экскурсии. Справочное пособие. — Томск: ТГУ, 2010. — 144 с.
6. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 84 с.

Н.В. Мякишева, З.М. Жумангалиева

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АНТРОПОГЕННО НАГРУЖЕННЫХ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

N.V. Myakisheva, Zariia Zhumangalieva

CURRENT STATE OF ANTHROPOGENICALLY STRESSED FRESHWATER LAKES OF KAZAKHSTAN

Выполнена многокритериальная оценка качества вод озер на основе метода рандомизированных сводных показателей. Получены сводные индексы качества вод. Проанализированы графики межгодовой и внутригодовой изменчивости качества вод озер. Выявлена цикличность качества вод. Используются натурные данные состояния озер по 15 гидрофизическим и гидрохимическим параметрам, содержанию токсичных веществ за многолетний период наблюдений. Рассмотрены озера Щучинско-Боровской курортной зоны Казахстана — Боровое, Большое Чебачье и Щучье.

Ключевые слова: озера, качество вод, метод рандомизированных сводных показателей.

The multicriteria assessment of water quality of the lakes by using randomized integral indices method was performed. Aggregate indices of water quality were obtained. Graphics of inter-annual and inter-annual variability of water quality of lakes were analyzed. The timing of water quality was revealed. In-situ long-term data of the state of lake systems 15 hydrophysical and hydrochemical parameters, content of toxic substances of Shchuchinsk Borovoye resort area.

Key words: lakes, water quality, Aggregated Indices Method.

Введение

Озера Щучинско-Боровской курортной зоны (ЩБКЗ) располагаются на территории Национального природного парка «Бурабай» Акмолинской области Северного Казахстана — обширной степной зоны недостаточного увлажнения. Существование данных водоемов уникально для этих мест, поскольку они являются пресными, достаточно глубокими и никогда не пересыхают.

Исследование качества вод озер актуально для данного антропогенно нагруженного (водообеспечение и водоотведение, сельскохозяйственная и рекреационная деятельность) региона.

Материалы и методы

Для оценки качества воды были использованы данные Центра гидрометеорологического мониторинга г. Астаны (РГП «Казгидромет» Министерства охраны окружающей среды Республики Казахстан), осуществляющего экологический мониторинг озер Боровое, Большое Чебачье и Щучье, с месячной дискретностью за 2002–2010 гг.

Были выбраны 15 параметров состояния водных экосистем (гидрофизические данные: содержание взвешенных веществ, прозрачность и цветность воды; гидрохимические параметры: кислотность водной среды (рН), содержание нитратного (NO_3) и аммонийного азота (NH_4), содержание фосфатов (PO_4), содержание кислорода (O_2 , %) и биологическое потребление кислорода (БПК₅); содержание токсических веществ: нефтепродукты, СПАВ, концентрация меди, ртути, цинка, фтора). Выбор группы токсических веществ обусловлен превышением данных веществ относительно ПДК в водоемах на протяжении анализируемого периода времени.

Основой для разработки подходов к многокритериальной оценке качества вод озер ШБКЗ Северного Казахстана явился метод рандомизированных сводных показателей, математическая теория которого предложена Н.В. Ховановым [9]. Правила построения сводных показателей качества вод опубликованы в серии работ по многокритериальной оценке состояния и устойчивости природных и антропогенно трансформированных систем [2, 3, 5–7].

Все 15 исходных характеристик разбиты на три однородные группы: гидрофизические (г/ф), гидрохимические (г/х), содержание токсических веществ (УТЗ): неорганических и органических. Оценивалась принадлежность вод к одному из пяти классов качества, алфавит которых был взят из комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши [8]. Данная классификация содержит более подробный перечень параметров качества воды. Имеющиеся в классификации интервалы классов (градации) практически идеально подходят для свертки информации.

Переход из пространства наблюдений x_i в пространство признаков $q_i = q_i(x_i)$ осуществлялся процедурой нормализации. При нормализации исходных характеристик x_i считается, что значение $q_i = 0$ соответствует близости природных вод к чистому состоянию, а $q_i = 1$ — к грязному. Таким образом, по мере загрязнения водоема показатели q_i будут расти от 0 до 1. Для таких исходных характеристик, как прозрачность воды и процентное содержание растворенного кислорода, задана монотонно убывающая зависимость отдельных показателей q_i от соответствующих исходных характеристик x_i . Такая зависимость определяется формулой (1) и означает, что при росте исходной характеристики, например прозрачности воды от минимальных значений к максимальным, величина отдельного показателя уменьшается от 1 до 0, т.е. качество воды изменяется от грязного к чистому. Иначе говоря, уменьшение прозрачности воды свидетельствует о загрязнении водоема.

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq x_{\min}, \\ \frac{x_i - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x_i \leq x_{\max}, \\ 1 & x_i > x_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Для остальных исходных характеристик качества вод задана монотонно возрастающая зависимость от них отдельных показателей (2) и имеет смысл, обратный описанному выше.

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq x_{\min}, \\ \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x_i \leq x_{\max}, \\ 0 & x_i > x_{\max}. \end{cases} \quad (2)$$

Снижение мерности призначного пространства и переход к системе обобщенных независимых признаков осуществляется при расчете сводных показателей $Q(q; I)$. На первом уровне исследований расчет $Q(q; I)$ производился для каждой из трех групп исходных характеристик с учетом дополнительной информации о приоритетном влиянии отдельных показателей на сводный (табл. 1). Значения математического ожидания рандомизированных весовых коэффициентов $p(I)$, полученные в результате арифметизации нечисловой дополнительной информации, использованной при расчете $Q(q; I)$, также приведены в табл. 1.

Таблица 1

Математическое ожидание сводных показателей по классам качества вод

Классы качества вод		г/ф	г/х	УТЗ	Единый показатель (г/ф + г/х)
Предельно чистая	предельно чистая	0–0,01	0–0,006		0–0,008
Чистая	очень чистая	0,01–0,3	0,006–0,033		0,008–0,16
	вполне чистая	0,31–0,36	0,033–0,04		0,17–0,22
Удовлетворительной чистоты	достаточно чистая	0,37–0,42	0,04–0,07	0–0,001	0,23–0,28
	слабо загрязненная	0,43–0,48	0,08–0,14	0,001–0,057	0,29–0,35
Загрязненная	умеренно загрязненная	0,49–0,55	0,15–0,22	0,057–0,066	0,36–0,44
	сильно загрязненная	0,56–0,69	0,23–0,33	0,066–0,16	0,45–0,65
Грязная	весьма грязная	0,7–0,99	0,34–0,61	0,17–0,41	0,66–0,99
	предельно грязная	0,99–1	0,62–1	0,42–1	0,99–1
Дополнительная информация (вариант приоритетности)			$O_2 > NH_4 > NO_3 > PO_4 > pH$; $O_2 \leq 0,4$	$Zn = Cu = Hg = F$; СПАВ=НФП	г/ф=г/х

На втором уровне оценивался единый сводный показатель качества вод. При этом применялись разные наборы дополнительной информации о приоритетном влиянии гидрофизических, гидрохимических характеристик и информации о токсическом загрязнении воды. В табл. 1 в качестве примера указаны значения математического ожидания единого показателя (для гидрофизических и гидрохимических характеристик),

вычисленные при одном из наборов дополнительной информации. Исходными данными для его расчета послужили результаты первого уровня.

Свертка информации для трех озер осуществлялась в двух направлениях: первое — выборка значений 15 характеристик для каждого месяца за все 9 лет (с 2002 по 2010 г.) для анализа внутригодовой динамики качества воды; второе — выборка 15 характеристик качества для каждого месяца каждого года для анализа многолетней динамики. При этом на первом уровне происходила свертка данных для каждого озера отдельно по гидрофизическим, гидрохимическим параметрам и уровню токсического загрязнения. На втором уровне свертки получали единый сводный показатель для гидрофизических и гидрохимических данных. Уровень токсического загрязнения анализировался отдельно, так как он по комплексной классификации имеет различные степени градации классов качества воды. Таким образом, были получены данные качества вод, иллюстрируемые на рис. 1–4.

Результаты

Многокритериальная оценка качества вод озер Щучинско-Боровской курортной зоны в рамках существующих в настоящее время представлений о классах качества и о приоритетном влиянии отдельных показателей на общую характеристику, а также в условиях дефицита исходной информации показала следующее.

Графики выявили периоды низкого и высокого качества воды озер. Согласно гидрохимическим данным, качество вод озер находится в пределах от «удовлетворительно чистой» до «загрязненной». Причем, между озерами нет существенных различий — практически одновременно происходит снижение и рост качества воды. Также заметна внутригодовая динамика, которую можно более детально проследить на рис. 4а и 4б.

Гидрофизические данные озер демонстрируют лучшую ситуацию, поскольку вода в озерах значительный период времени была «чистой». До 2007 г. динамика качества вод имела более длительные циклы и колебалась существенно от «предельно чистой» до «загрязненной». После 2007 г. циклы уменьшились, внутригодовая динамика стала более отчетливой. Качество воды в озерах Боровом и Щучьем в начале 2010 г. по гидрофизическим данным снижается.

При сведении гидрофизических и гидрохимических характеристик в единый показатель качества было выявлено озеро с преимущественно низким качеством воды (оз. Большое Чебачье) по сравнению с другими. После 2005 г. вода в озерах теряет свое качество, практически в начале каждого года переходит в разряд «загрязненной», что может быть обусловлено накоплением в водах загрязняющих веществ.

График уровня токсического загрязнения водоемов иллюстрирует распространение «весьма грязной» воды. На протяжении всего времени года в озерах качество воды снижается, достигает критических значений в середине года при интенсивной (предполагается) антропогенной нагрузке.

При анализе графиков внутригодовой динамики качества озерных вод за 9 лет в течение каждого месяца был выявлена цикличность. Сведенные гидрофизические и гидрохимические показатели (рис. 4а) демонстрируют более низкое качество вод оз. Большое Чебачье по сравнению с другими двумя (качество вод в оз. Боровое и Щучье находится в пределах от «чистых» до «удовлетворительно чистых»).

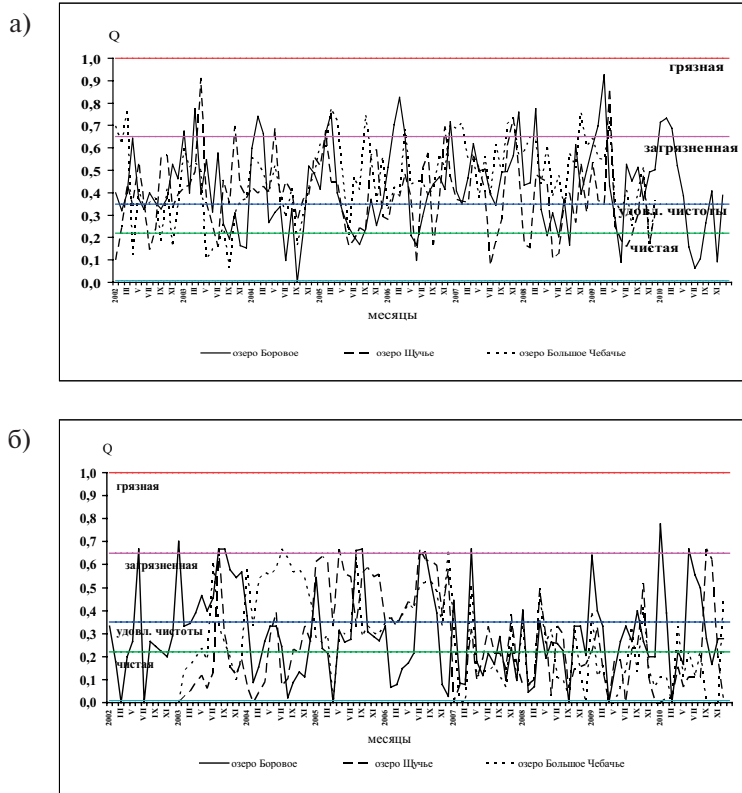


Рис. 1. Качество воды озер за многолетний период (2002–2010 гг.) по гидрохимическим (а) и гидрофизическим (б) данным

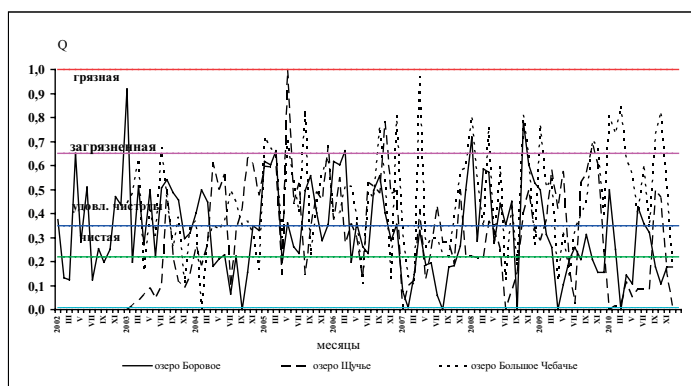


Рис. 2. Качество воды озер за многолетний период (2002–2010 гг.) по сведенным гидрохимическим и гидрофизическим данным

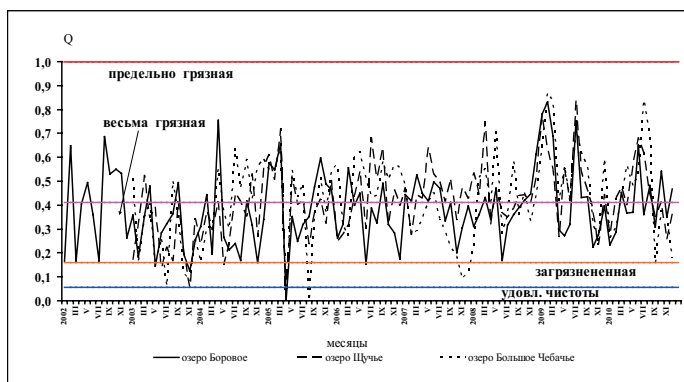


Рис. 3. Качество воды озер за многолетний период (2002–2010 гг.) по уровню токсического загрязнения

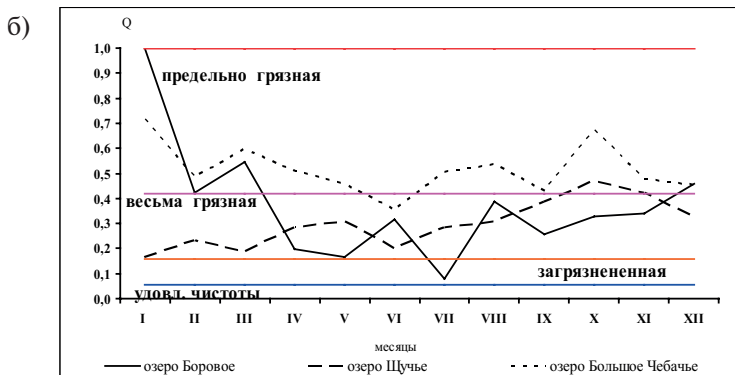
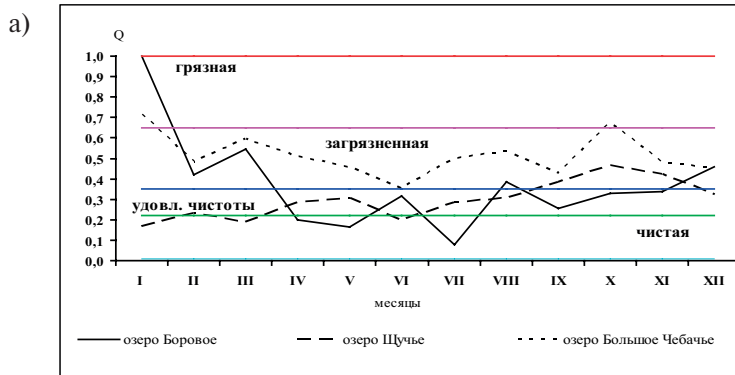


Рис. 4. Качество воды озер в течение года за многолетний период (2002–2010 гг.):
при сведении гидрофизических и гидрохимических характеристик (а)
и по уровню токсического загрязнения (б)

В начале года качество воды имеет низкие значения, что может быть обусловлено естественными процессами: органическое вещество, поступившее в экосистему извне или накопившееся в ней, слабо минерализуется, но из-за нахождения в воде достаточного количества биогенных элементов, может развиваться цветение водорослей.

Весной наблюдается рост качества воды, что может быть обусловлено сезонными изменениями состава вод (распреснение водоемов, обогащение вод кислородом, пополнение запасов биогенными элементами). Также в этот период заметны весенние вспышки фитопланктона, которые представляют собой естественный процесс эвтрофирования водоемов.

В летний период времени наблюдаются антропогенно обусловленное эвтрофирование водоемов, что заметно ухудшает качество вод. К осени эти процессы замедляются (обменные процессы живых организмов, зависящие от температурных условий, ослабевают; содержание органического взвеси увеличивается, концентрация компонентов растворенной органики стабилизируется, биомасса и продукция живых организмов уменьшаются). Происходит общее оздоровление среды. Эти процессы иллюстрирует внутригодовая динамика качества вод озер по сведенным гидрохимическим и гидрофизическим параметрам.

На рис. 4б представлена динамика качества вод исходя из загрязнения озер токсическими веществами.

Качество вод изменяется от «загрязненной» до «весьма грязной». Вода оз. Большое Чебачье является наиболее грязной. В начале года наблюдается самое низкое качество вод, что может быть обусловлено накоплением в воде токсических веществ. С наступлением весны происходит распреснение водоемов, поступление свежих вод, их перемешивание, тогда качество воды улучшается. При интенсивном антропогенном использовании озер в летний период, заметны колебания качества вод — происходит загрязнение воды.

Выводы

1. При задании равных приоритетов между характеристиками качества исследуемые озера оказались в группе чистых вод с разрядностью «вполне чистая». При учете приоритета степени токсического загрязнения, воды озер попали в третий класс удовлетворительной чистоты с разрядностью «слабо загрязненных вод».
2. С помощью применения метода сводных показателей была произведена многокритериальная оценка качества вод озер Щучинско-Боровской курортной зоны. Методика данного исследования может быть применена для более углубленного изучения состояния водоемов данной территории или Северного Казахстана в целом.

Литература

1. Богословский Б.Б., Филь С.А. Классификация водоемов по внешнему водообмену. Географо-гидрологический метод исследования вод суши. — М.: изд. АН СССР. Геогр. об-во СССР, 1984, с. 54–60.
2. Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Хованов Н.В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. Ст. 1. Качество природных вод. // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география, 1996, вып. 3 (№ 21), с. 40–52.

3. *Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Третьяков В.Ю. и др.* Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. Ст. 2. Трофический статус водных экосистем. // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география, 1997, вып. 1 (№ 7), с. 51–67.
4. *Догановский А.М.* Уровенный режим озер — интегральный показатель динамики их биоценозов. Дис. на соискание учен. степени д-ра географ. наук. — СПб., 1994. — 348 с.
5. *Догановский А.М., Мякишева Н.В.* Построение комплексных индексов внешнего водообмена озер в условиях неопределенности и дефицита гидрологической информации. // Водные ресурсы, 2002, т. 29, № 3, с. 284–291.
6. *Мякишева Н.В.* Многокритериальная классификация озер. — СПб.: РГГМУ, 2009. — 160 с.
7. *Мякишева Н.В., Жумангалиева З.М.* Внешний водообмен озер зоны недостаточного увлажнения. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 27, с. 36–44.
8. *Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. // Гидробиол. журн., 1993, т. 29, № 4, с. 62–77.
9. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. — СПб.: изд-во Санкт-Петербургского университета, 1996. — 196 с.

Н.В. Игнатьева

ОЦЕНКА ПОТОКОВ ФОСФОРА В ПОГРАНИЧНОЙ ЗОНЕ ОСАДКОВ — ВОДА В ПСКОВСКО-ЧУДСКОМ ОЗЕРЕ

N. V. Ignatyeva

ESTIMATION OF PHOSPHORUS FLUXES IN THE SEDIMENT — WATER BOUNDARY ZONE IN LAKE PEIPSI

Оценены основные потоки фосфора в пограничной зоне осадков — вода в разных частях Псковско-Чудского озера: седиментация, захоронение в толще осадка, поступление из донных отложений в воду. Ориентировочная величина внутренней фосфорной нагрузки на озеро соизмерима с внешней нагрузкой и составляет 43–45 % суммарного годового поступления фосфора в озеро.

Ключевые слова: фосфор, эвтрофирование, обмен осадков — вода, внутренняя фосфорная нагрузка.

Main phosphorus fluxes across the sediment — water interface: sedimentation, burial within the sediment and release to the overlying water, have been estimated in different areas of Lake Peipsi. Estimated tentative value of internal phosphorus load is commensurable with the value of external phosphorus load, and is equal to 43–45 % of total annual phosphorus input into the lake.

Key words: phosphorus, eutrophication, sediment — water exchange, internal phosphorus load.

Введение

Одним из главнейших факторов, определяющих уровень первичного продуцирования в озерах, является обеспеченность озерных экосистем фосфором. Важную роль в формировании фосфорного запаса в водной массе играют процессы, происходящие в пограничной зоне осадков — вода и верхнем слое донных отложений. Здесь непрерывно осуществляется накопление, трансформация и транспорт фосфорсодержащих соединений в противоположных направлениях как внутри осадка, так и через границу раздела осадков — вода. Наиболее интенсивно процессы раннего диагенеза протекают в верхнем слое осадка, поэтому еще с 30-х гг. прошлого столетия донные отложения стали делить на верхний, примерно 10-см «активный слой», принимающий участие во всем озерном метаболизме, и более глубокий «исторический слой».

Основными потоками фосфора в пограничной зоне осадков — вода являются потоки седиментации на поверхность дна (S), захоронения в толще осадка (B) и поступления из донных отложений в водную массу (J). В низкопродуктивных водоемах донные отложения выступают в основном в качестве накопителя фосфора, таким образом осадконакопление является одним из факторов самоочищения водной массы. По мере развития процесса эвтрофирования интенсивность материального обмена на

границе раздела осадок — вода возрастает, при этом меньшая доля биогенных веществ накапливается в осадках, тогда как существенно возрастает вторичное их поступление из донных отложений в водную толщу, создающее внутреннюю биогенную нагрузку (*I*) на водоем.

К числу крупных пресноводных озер, в значительной степени подверженных антропогенному эвтрофированию, относится Псковско-Чудское озеро — четвертый по площади водного зеркала (3555 км²) мелководный водоем Европы и крупнейший трансграничный водоем (с 1992 г.), расположенный на границе между Россией и Эстонией. Этот озерный комплекс состоит из трех отчетливо различающихся между собой частей: большого Чудского, меньшего Псковского озер и соединяющего их пролива, именуемого Теплым озером. Процесс антропогенного эвтрофирования Псковско-Чудского озера начался в 50-х гг. прошлого века, но стал очевидным только в 90-х [7]. В 1991–1994 гг. озеро относилось к эвтрофному типу, преимущественно слабозагрязненному с отдельными более сильно загрязненными участками. На данном этапе существования Псковское озеро классифицируется как гиперэвтрофное, Теплое озеро — переходящее к гиперэвтрофному, Чудское — эвтрофное озеро [8].

Основным фактором, стимулирующим развитие фитопланктона в озере и его эвтрофирование, является интенсивное поступление фосфора с водосборной территории. В настоящее время внешняя фосфорная нагрузка (*L*) на озеро составляет около 830–900 т год⁻¹, при этом соотношение между значениями нагрузки с российской и эстонской частей водосбора соответствует соотношению их площадей [3]. Что касается внутренней нагрузки, то она до сих пор не была оценена. Известна лишь единичная оценка потока фосфора со дна, составляющая около 0,2 г Р м⁻²год⁻¹, которая сделана эстонскими исследователями на основе анализа колонки глинистых донных отложений, отобранных в центральной части Чудского озера на эстонской территории [6].

Основная цель работы заключалась в оценке потоков фосфора в пограничной зоне осадок — вода и роли донных отложений в круговороте фосфора в Псковско-Чудском озере на современном этапе его существования.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены материалы, собранные летом 2008 г. на мониторинговых станциях Псковского отделения ГосНИОРХ, расположенных на российской части Псковско-Чудского озера, а также в летне-осенний период 2013 г. на глинистых осадках центральной части Чудского озера. Донные отложения (колонки мощностью 10–15 см) отбирались дночерпателем Экмана-Берджа, придонная вода — батометром Limnos. В целом, отбор проб производился на 10 станциях: 5 станций в Чудском озере, 5 — в Псковском озере, одна из которых (ст. 21) находится в дельте р. Великой — основного притока озера (рис. 1а). Большая часть станций (за исключением ст. 13 и 39) расположена в зоне залегания тонкодисперсных осадков (рис. 1б).

Фосфор твердой фазы донных отложений анализировался по методу Мета в модификации М.В. Мартыновой и Н.А. Шмидеберг [5].



Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб (а) и распространение структурных типов донных отложений Псковско-Чудского озера (б)

На основе данных о содержании общего фосфора (ТР) в поверхностном слое отложений и скоростях осадконакопления [6] были рассчитаны потоки седиментации фосфора на дно озера. Для расчета захоронения фосфора использованы данные о содержании ТР в осадке на глубине 10–15 см от поверхности. Оценка потоков фосфора из донных отложений в воду и внутренней фосфорной нагрузки выполнена по методу, разработанному в ИНОЗ РАН [1, 2]. Данный метод дает оценку суммарного потока фосфора со дна, формирующегося в результате действия различных механизмов в течение определенного промежутка времени, например, года. В глубоководных районах крупных водоемов формирование внутренней нагрузки происходит в стационарных (квазистационарных) условиях, при которых абсолютные значения и соотношение потоков вещества в пограничной зоне осадок — вода остаются практически постоянными в течение годового цикла. Поскольку в мелководных полимиктических водоемах, каким является Псковско-Чудское озеро, абсолютные значения и соотношение потоков вещества подвержены сезонным изменениям, т.е. условия стационарности не соблюдаются, данную оценку внутренней фосфорной нагрузки следует рассматривать как ориентировочную.

Фосфор твердой фазы донных отложений. Результаты выполненного анализа проб осадков показывают, что в целом, для Псковского озера, как водоема более высокого трофического статуса, характерно более высокое содержание общего фосфора в поверхностном слое (наилке) донных отложений (в среднем в полтора раза), чем для Чудского озера (соответственно, 0,278–1,788 и 0,717–1,408 мг P г⁻¹) (расчет сделан на

воздушно-сухую навеску — в.с.н.). Независимо от гранулометрической характеристики, фосфор содержится в твердой фазе донных отложений озера в основном в форме неорганических соединений (IP). Доля органического фосфора (OP) составляет 20–41 % TP в Чудском озере и 24–30 % в Псковском озере.

Прослеживается закономерная тенденция увеличения содержания фосфора в осадках с глубиной в озере и от грубодисперсных к тонкодисперсным осадкам. Это объясняется как транспортом оседающего на дно материала в более глубоководную зону, так и неспособностью песчаных и опесчаненных отложений удерживать фосфат-ионы.

Исследование вертикального распределения фосфора в колонках донных отложений показало, что в Псковском озере наблюдается более резкое, чем в Чудском озере, снижение содержания общего и неорганического фосфора на глубине 10–15 см в осадке по сравнению с поверхностным слоем (наилком). В качестве примера на рис. 2 представлен вид вертикальных концентрационных профилей форм фосфора в иловых отложениях на ст. 10 и 19, соответственно, в Чудском и Псковском озерах.

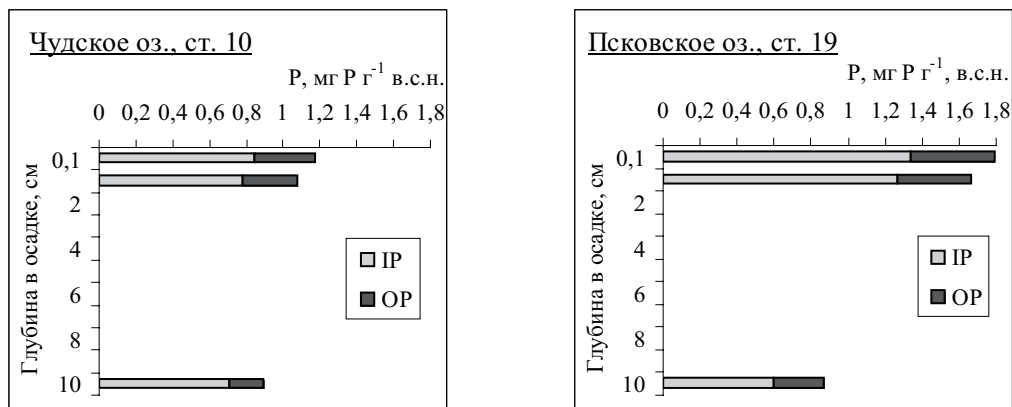


Рис. 2. Вертикальный профиль распределения форм фосфора в твердой фазе тонкодисперсных донных отложений на ст. 10 (Чудское озеро) и ст. 19 (Псковское озеро)

Фосфор порового раствора. От 70 до 80 % объема алевритов и до 92–95 % объема илов Псковско-Чудского озера занимает поровое пространство, заполненное поровым раствором — наиболее мобильной фракцией донных отложений, в которой осуществляется диффузионный транспорт фосфора, главным образом, в форме фосфат-ионов. Концентрации неорганического фосфора в поровом растворе осадков Чудского озера изменялись в основном в диапазоне 0,012–0,040 мг P л⁻¹, Псковского озера — 0,036–0,082 мг P л⁻¹, т.е. были в 2–3 раза выше, что также вполне закономерно, поскольку по мере развития процесса эвтрофирования происходит обогащение порового раствора биогенными элементами. Концентрации фосфатов в поровом растворе подвержены значительным сезонным изменениям. Так, в течение летне-осеннего периода концентрации в поровых растворах иловых отложений Чудского озера изменялись в 2–2,5 раза.

Седиментация и захоронение фосфора в донных отложениях. В табл. 1 представлены значения потоков седиментации и захоронения фосфора в донных отложениях на станциях отбора проб. Меньше всего фосфора оседает в районах залегания алевритовых отложениях (ст. 13 и 39) и на ст. 54, расположенной вблизи от восточного побережья Чудского озера.

Таблица 1

Потоки седиментации (S), захоронения (B) и поступления фосфора из донных отложений в воду (J) Псковско-Чудского озера ($\text{мг Р м}^{-2}\text{сут}^{-1}$) и соотношение основных потоков на станциях отбора проб

Район озера	Чудское озеро						Псковское озеро			
Тип донных отложений	ил				алеврит		ил			
Номер станции	54	6	10	11	13	39	18	19	20	21
S	1,09	1,52	1,69	3,01	0,96	1,28	2,01	2,30	2,17	3,10
B	0,99	1,09	1,28	1,79	0,85	0,54	1,01	1,11	0,90	1,36
$B/S, \%$	90	72	78	60	89	42	50	48	41	44
J	0,11	0,43	0,41	1,21	0,11	0,74	1,01	1,19	1,27	1,75
$J/S, \%$	10	28	24	40	11	58	50	52	59	56

Наибольшие величины потоков седиментации относятся к иловым отложениям ст. 11 (Чудское озеро) и к ст. 1, расположенной в дельте р. Великая. В целом, плотность потоков седиментации в Псковском озере выше, чем в Чудском озере. Наибольшие величины потоков относятся к зонам залегания тонкодисперсных осадков. Плотность потоков захоронения фосфора в тонкодисперсных отложениях примерно одинакова, независимо от района озерной системы.

С учетом пространственного распределения типов осадка подсчитано, что в течение года на дно Псковско-Чудского озера оседает 1890 т фосфора, из них 1275 т в Чудском озере и 615 т в Псковском и Теплом озере (табл. 2). Около 73 % осевшего на дно Чудского озера фосфора захоранивается в осадке, соответствующая доля фосфора в Псковском озере в полтора раза ниже — 47 % (средние значения для станций отбора проб), т.е. удерживающая способность осадков по отношению к фосфору (B/S) снижается с повышением трофического статуса водоема. В среднем, во всей озерной системе захоранивается 65 % седиментировавшего фосфора.

Таблица 2

Седиментация и захоронение фосфора в донных отложениях Псковско-Чудского озера

Район озера	Седиментация		Захоронение		$B/S, \%$
	$\text{г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$	т год^{-1}	$\text{г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$	т год^{-1}	
Чудское озеро	0,582	1275	0,410	936	73
Псковское и Теплое озеро	0,750	615	0,327	288	47
Все озеро	0,628	1890	0,387	1224	65

Поступление фосфора из донных отложений в воду. Бóльшая величина убыли фосфора с глубиной в колонках осадков Псковского озера свидетельствует о более интенсивном его поступлении из осадков в водную массу по сравнению с Чудским озером. Рассчитанные величины потоков фосфора из донных отложений составляют $0,738\text{--}1,748 \text{ мг Р м}^{-2}\text{сут}^{-1}$ для Псковского озера и $0,106\text{--}1,214 \text{ мг Р м}^{-2}\text{сут}^{-1}$ для Чудского озера (табл. 1, рис. 3). Наименьший поток относится к илистым отложениям ст. 54 (Чудское озеро), наибольший к ст. 21, расположенной в дельте р. Великая. Обобщение литературных данных, сделанное М.В. Мартыновой [4], показывает, что в среднем для пресноводных водоемов мезо-эвтрофного типа величина выделения фосфора со дна составляет десятые доли миллиграмма с квадратного метра в сутки, не превышая $1 \text{ мг Р м}^{-2}\text{сут}^{-1}$. С повышением продуктивности водоема величина потока со дна существенно возрастает. По мере удаления от устья р. Великая в северном направлении поступление фосфора из донных отложений Псковского озера имеет тенденцию к снижению (рис. 3).

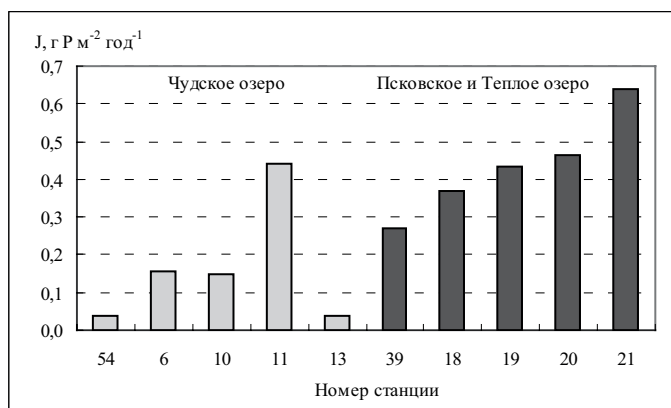


Рис. 3. Распределение потоков фосфора из донных отложений озера вдоль условного продольного разреза с севера на юг

В табл. 3 представлены величины годовых потоков фосфора из различных типов донных отложений и со всей площади дна озера. Как можно заметить, из тонкодисперсных осадков (глинистых, алевритово-глинистых и мелкоалевритовых илов) Чудского озера в воду поступает в 5 раз больше фосфора, чем из других типов озерных осадков (песков, алевритистых песков, крупноалевритовых илов) — соответственно, $0,197$ и $0,039 \text{ г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$. Полученная величина ($0,197 \text{ г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$) хорошо согласуется с расчетом потока фосфора из илистых осадков центральной части Чудского озера, приведенным в работе Пуннинга и Капанен (2009). Поток фосфора из илистых отложений Псковского озера ($0,419 \text{ г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$) в 2 раза больше соответствующего потока со дна Чудского озера и в полтора раза больше потока из других типов отложений ($0,269 \text{ г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$) Псковского озера. В среднем, плотность потока фосфора из донных отложений Псковского озера втрое выше, чем Чудского озера (соответственно, $0,460$ и

0,155 г Р м⁻²год⁻¹). С учетом пространственного распределения типов донных отложений рассчитано, что ежегодно из донных отложений в водную массу Псковско-Чудского озера поступает 667 т фосфора, причем примерно равное количество из отложений Чудского озера (339 т) и Псковского и Теплого озер (328 т). В расчет не включены площади дна озера, занятые мореной, ленточными глинами и торфом, на которых не происходит озерного осадконакопления. Величина внутренней фосфорной нагрузки на данном этапе существования озера составляет 74–80 % от внешней нагрузки.

Таблица 3

Поступление фосфора из донных отложений Псковско-Чудского озера

Тип донных отложений	Площадь, км ²	J	
		г Р м ⁻² год ⁻¹	т год ⁻¹
Чудское озеро			
Тонкодисперсные отложения	1605	0,197	316
Другие типы озерных донных отложений	586	0,039	23
Вся площадь озерных донных отложений	2191	0,155	339
Псковское и Теплое озеро			
Тонкодисперсные отложения	712	0,419	299
Другие типы озерных донных отложений	108	0,269	29
Вся площадь озерных донных отложений	820	0,460	328
Псковско-Чудское озеро			
Вся площадь озерных донных отложений	3011	0,221	667

Диффузия фосфат-ионов из толщи донных отложений является одним из механизмов их поступления в водную массу и вносит вклад в формирование суммарного потока (J). Оценка величины этой составляющей потока, сделанная на основе данных натурных наблюдений в соответствии с первым законом диффузии Фика, показала, что диффузионные потоки составляют в Псковском озере 0,008–0,053 мг Р м⁻²сут⁻¹, в Чудском озере — 0,000–0,154 мг Р м⁻²сут⁻¹, что не превышает 4 и 13 % суммарных потоков фосфора, соответственно, в Псковском и Чудском озерах. Очевидно, основными транспортными механизмами поступления фосфора со дна Псковско-Чудского озера являются конвективный перенос, диффузия непосредственно с поверхности осадка и конвективно-диффузионный механизм, действующий в период осеннего охлаждения. Следует отметить, что величина диффузионных потоков в значительной степени подвержена сезонным изменениям.

Выводы

Анализ результатов работы показывает, что содержание и соотношение форм фосфора в донных отложениях Псковско-Чудского озера определяются главным образом типом осадка и биологической продуктивностью водоема в районе залегания

осадка. С ростом степени дисперсности донных отложений содержание всех форм фосфора в них увеличивается. Для Псковского озера, как более высокопродуктивного водоема, характерно более высокое содержание общего и неорганического фосфора в поверхностном слое донных отложений (в среднем в полтора раза) по сравнению с Чудским озером.

На современном этапе донные отложения Псковско-Чудского озера играют значимую роль в функционировании экосистемы в качестве источника вторичного поступления фосфора в водную массу. Рассчитанная величина внутренней фосфорной нагрузки на озеро соизмерима с внешней нагрузкой и составляет 43–45 % суммарного годового поступления фосфора в озеро. Плотность потока фосфора из донных отложений Псковского и Теплого озер в 3 раза превосходит соответствующую величину для Чудского озера.

Полученную величину внутренней фосфорной нагрузки ($0,221 \text{ г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$ или 667 т год^{-1}) следует считать ориентировочной. Вероятнее всего, реальная величина выше полученного при данном методе оценки значения, поскольку метод недоучитывает оборачиваемость фосфора и конвективный перенос при ветровом и антропогенном перемешивании. Более точную величину внутренней фосфорной нагрузки можно получить на основе данных натурных наблюдений, выполняемых периодически (например, ежемесячно) в течение годового цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-05-00702-а.

Литература

1. *Игнатьева Н.В.* Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе раздела вода-дно в Ладожском озере. // Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Институт озераедения РАН. — СПб., 1997. — 24 с.
2. *Игнатьева Н.В.* Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме. // В кн.: Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. — СПб.: Наука, 2002, с. 148–157.
3. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: РАН, 2010. — 102 с.
4. *Мартынова М.В.* Закономерности процессов накопления, трансформации и выделения со дна водоемов соединений азота и фосфора. // Автореф. дисс. докт. геогр. наук. — Ростов-на-Дону, 1988. — 47 с.
5. *Мартынова М.В., Шмидеберг Н.А.* О методах определения различных форм фосфора в донных наносах. // Гидрохимические материалы, 1983, т. 85, с. 49–55.
6. *Šumberova B.* Transboundary Water Management on the Future Border of the European Union — Lake Peipsi. — Электронный журнал. — Budapest, 2003.
7. *Staltnacke P., Vasiliev A., Skakalsky B. et al.* Nutrient loads to Lake Peipsi (Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–99). — Электронный журнал. — Jordforsk Report, N 4/01, 2001.
8. *Punning J.-M., Karanen G.* Phosphorus flux in Lake Peipsi sensu stricto, Eastern Europe. // Estonian Journal of Ecology, 2009, 58 (1), pp. 3–17.

С.Д. Голосов, И.С. Зверев, Е.А. Шипунова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ОЗЕРАХ ПСКОВСКО-ЧУДСКОЙ СИСТЕМЫ

S.D. Golosov, I.S. Zverev, E.A. Shipunova

MODELING SEASONAL CHANGES IN CONTENT OF DISSOLVED OXYGEN IN PSKOVSKO-CHUDSKOYE LAKE SYSTEM

Разработанная в Институте озероведения РАН параметризованная математическая модель FLakeEco адаптирована к условиям Псковско-Чудской озерной системы. Результаты верификации модели по данным натурных наблюдений продемонстрировали ее адекватность реальным гидрофизическим и химико-биологическим процессам, происходящим в озерах под влиянием метеорологических условий.

Ключевые слова: моделирование, модель FLakeEco, термический и кислородный режим.

The reduced lake ecosystem model FLakeEco is adapted to the conditions of the Pskovsko-Chudskoye lake system. The model is based on the self-similar representation of the vertical distribution of the concentration of dissolved oxygen in lake water. The results of verification against field data revealed the fairly well ability of the model to describe the main physical, chemical and biological processes in lakes.

Key words: modeling, FLakeEco model, thermal and oxygen regime.

Общие положения

Содержание растворенного кислорода (РК) является одним из важнейших показателей качества воды в озере. Концентрация кислорода играет решающую роль в создании величины окислительно-восстановительного потенциала и в значительной мере определяет направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений. Анаэробные условия, возникающие при дефиците кислорода, способствуют протеканию химических и биохимических реакций восстановительного типа, в результате чего в воде накапливаются такие токсичные соединения как аммонийный азот, метан, сероводород, а также гниющие растительные остатки. Все это приводит к тому, что озера становятся практически непригодными для нужд питьевого водоснабжения и рекреации, коренным образом изменяются условия обитания гидробионтов, что ведет к снижению рыбопродуктивности водоема. Главными факторами, определяющими кислородный режим озера, являются условия аэрации и биологическая продуктивность. Аэрация водоема, в свою очередь, зависит от возможности перемешивания водной массы и продолжительности подледного периода, а биологическая продуктивность определяется, в основном, уровнем биогенной нагрузки на водоем.

Псковско-Чудская озерная система представляет собой один из крупнейших в Европе водоемов (четвертый по площади акватории и седьмой по запасам пресной воды). Система является трансграничной, расположенной между Россией и Эстонией. Водоем активно используется обеими сторонами для рыболовства, хозяйственных нужд и рекреации.

Процесс антропогенного эвтрофирования Псковско-Чудского озера начался в 50-х гг. прошлого века, но стал очевидным только в 90-х. В 1991–1994 гг. озеро относилось к эвтрофному типу, преимущественно слабозагрязненному с отдельными более сильно загрязненными участками. На данном этапе существования Псковское озеро классифицируется как гиперэвтрофное, Теплое озеро — переходящее к гиперэвтрофному, Чудское — эвтрофное озеро. Кроме того, озера существенно различаются по условиям перемешивания водной массы. Более мелководное Псковское озеро является полимиктическим, т.е. перемешивание водной массы от поверхности до дна происходит в нем многократно в течение года. Чудское озеро — в основном димиктическое, т.е. перемешивается дважды в год во время весенней и зимней конвекции.

В силу трансграничного положения осуществление мониторинга всей акватории озерной системы затруднено. В такой ситуации методы математического моделирования могут служить незаменимым средством оценки текущего состояния и прогнозирования возможных изменений в озерных экосистемах. Ниже приводятся первые результаты моделирования термического и кислородного режимов озер Псковско-Чудской системы с использованием моделирующей системы FLake-FLakeEco, разработанной совместными усилиями Института озераведения РАН и Германской службы погоды (DFG).

Моделирующая система FLake-FLakeEco

Среди природных водоемов значительную часть составляют мелководные озера и водохранилища со средними глубинами до 20–30 м и горизонтальными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Одной из основных особенностей таких водоемов является существенная горизонтальная однородность поля температуры в них и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. Озера Псковско-Чудской системы принадлежат именно к таким водоемам. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, основаны на ясных физических предпосылках, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов.

Примером модели такого типа является модель FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, и Службы погоды Германии (DWD). Модель FLake является универсальной математической моделью гидротермодинамики озера, в которой реализованы последние достижения в области физической лимнологии. Модель применяется

для решения широкого круга лимнологических проблем. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий модель внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран мира — Российской Федерации, Германии, Великобритании, Канады, Португалии, США, Франции, Финляндии, Швеции и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды. Работа с моделью FLake может осуществляться, в частности, с международного сайта модели www.lakemodel.net.

Детальное описание модели дано в [1, 2]. В настоящей работе схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег—лед—водная масса—донные отложения, временная динамика которого рассчитывается в модели.

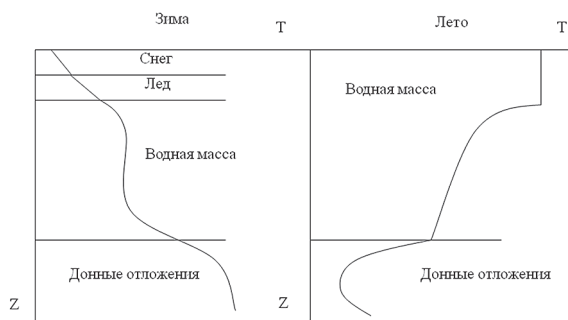


Рис. 1. Схема вертикального профиля температуры в системе снег—лед—водная масса—донные отложения, реализованная в модели FLake

Для описания особенностей формирования годового цикла растворенного кислорода под воздействием атмосферных, гидротермодинамических и химико-биологических факторов в настоящей работе использовалась модель FLakeEco, являющаяся экологическим «расширением» модели FLake. Детальное описание уравнений и параметризация модели приведены в [3, 4, 5]. На рис. 2 схематично представлены процессы, учитываемые в модели в периоды открытой воды и ледостава.

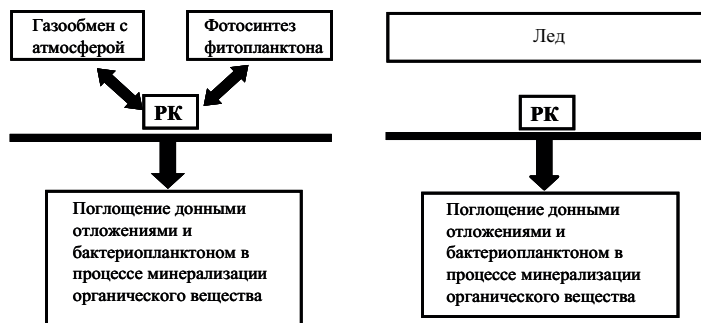


Рис. 2. Основные процессы, формирующие режим РК в водоеме и учитываемые в модели FLakeEco

Исходная информация для расчетов

Для выполнения расчетов по моделям FLake-FLakeEco в качестве входной информации были использованы данные реанализа метеорологических наблюдений для Чудского и Псковского озер за период с 2001 по 2007 г. Реанализ был выполнен для всего земного шара в национальных центрах по защите окружающей среды (NCEP) и исследованиям атмосферы (NCAR) США. Данные представляют собой ряды восстановленных величин метеорологических параметров — приходящей солнечной радиации, температуры воздуха, скорости ветра, абсолютной влажности, облачности, давления и осадков. Временной шаг между сроками «наблюдений» составляет 6 ч. Выборка необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки.

Данные натурных наблюдений

Для верификации модели в распоряжение авторов сотрудниками Псковского филиала ФГНУ ГосНИОРХ были любезно предоставлены данные натурных наблюдений за температурой воды и концентрацией растворенного кислорода, полученные в период с 2001 по 2007 г. Наблюдения выполнялись в центральных частях обоих озер и представляют собой временные ряды значений температуры воды и концентрации РК в поверхностном и придонном слоях водной массы.

Результаты верификация модели по данным натурных наблюдений

С использованием упомянутой выше исходной метеорологической информации по модели FLakeEco были выполнены расчеты изменчивости термического и кислородного режимов Чудского и Псковского озер в период с 2001 по 2007 г. Результаты сравнения результатов расчетов с данными натурных наблюдений представлены на рис. 3–6.

Очевидно, что модель адекватно — как качественно, так и количественно — описывает временную изменчивость температуры поверхности воды в обоих озерах и может быть использована для оценки реакции озерных экосистем на возможные изменения регионального климата.

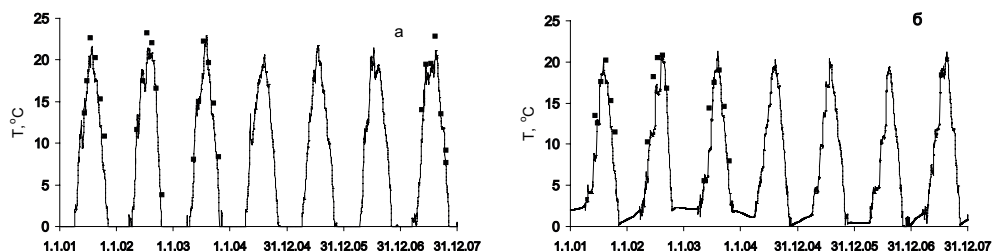


Рис. 3. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натурных наблюдений за температурой в Чудском озере: *а, б* — поверхностная и придонная температура соответственно.

Точки — измеренные данные, сплошная линия — результаты расчетов

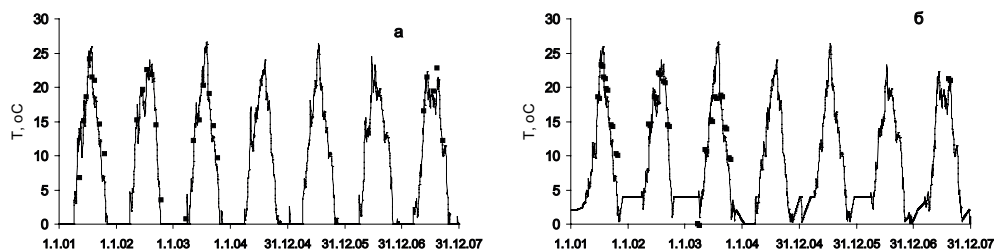


Рис. 4. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натурных наблюдений за температурой в Псковском озере. Обозначения — см рис. 3

Сезонная изменчивость термического режима озер

На основе анализа данных, представленных на рис. 3, 4 можно сделать самые общие заключения об особенностях сезонной изменчивости температуры водной массы в озерах. Так, Псковское озеро со средней глубиной около 3 м практически всегда в период открытой воды является полностью перемешанным от поверхности до дна. Периоды слабоустойчивой стратификации крайне непродолжительны, их появление носит случайный характер. В летний период водная масса озера хорошо прогревается — средняя температура столба воды в июле достигает 25–26°C. В зимний период в озере отчетливо выражен эффект подледного прогрева, когда температура воды подо льдом повышается от значений, близких к 0°C до температуры максимальной плотности.

Сезонная изменчивость термического режима Чудского озера имеет несколько другой характер. Средняя глубина озера составляет около 8 метров, что определяет возможность образования и более или менее длительного существования устойчивой плотностной стратификации водной массы. По той же причине озеро прогревается меньше, чем Псковское — летние температуры поверхности здесь составляют 20–22°C. Эффект подледного прогрева менее выражен. Это объясняется тем, что из-за наличия летней устойчивой плотностной стратификации придонные слои водной массы и донные отложения аккумулируют меньше тепла по сравнению с Псковским озером.

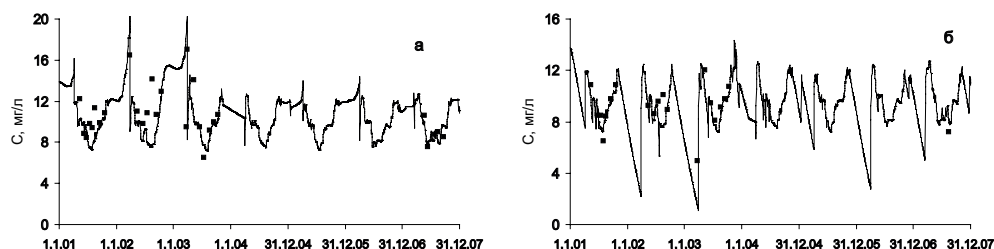


Рис. 5. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натурных наблюдений за концентрацией РК в Чудском озере: а, б — поверхностная и придонная концентрации соответственно.

Точки — измеренные данные, сплошная линия — результаты расчетов.

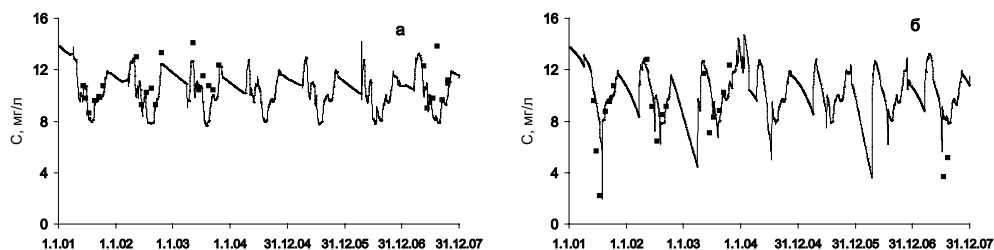


Рис. 6. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натурных наблюдений за концентрацией РК в Псковском озере. Обозначения — см рис. 5

Сезонная изменчивость кислородного режима озер

Данные, представленные на рис. 5, 6 свидетельствуют, что кислородный режим обоих озер в настоящее время не испытывает особых проблем по крайней мере в открытый период. Верхние слои водной массы хорошо перемешаны и, как следствие, насыщены растворенным кислородом. Уменьшение концентрации РК в придонных слоях носит кратковременный характер. Отсутствие данных наблюдений в период ледостава позволяет судить о режиме РК только по данным моделирования. В зимний период снижение концентрации РК в отсутствие атмосферной аэрации особенно заметно в Псковском озере. Учитывая высокий трофический статус озера (гиперэвтрофный водоем) и его мелководность это выглядит вполне естественным. В зимний период в придонной области в озере могут возникать анаэробные зоны.

В заключении к настоящей работе необходимо отметить, моделирующая система FLake-FLakeEco на примере Псковско-Чудской озерной системы подтвердила свою пригодность для решения широкого круга лимнологических проблем. Результаты верификации модели по данным наблюдений на Чудском и Псковском озерах продемонстрировали ее адекватность реальным гидрофизическим и химико-биологическим процессам, происходящим в озерах под влиянием метеорологических условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-05-00702-а.

Литература

1. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: Нестор-История, 2010. — 104 с.
2. Mironov D. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. // COSMO Technical Report, 2008, 11, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany. — 41 p.
3. Kondratiev S., Golosov S., Kreiman K., Ignatieva N. Modelling hydrological processes and mass transfer in a watershed-lake system. // Water Resources (Vodnye Resursy), 1998, 25, 571–580.
4. Golosov S., Ignatieva N. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes. // Hydrobiologia, 1999, 408/409, 153–157.
5. Golosov S., Maher O., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovenнова G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. // Oecologia, 2007, 151(2), 331–340.

Е.Н. Сутырина

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ И ОЗЕРЕ ХУБСУГУЛ**

E.N. Sutyryna

**APPLICATION OF THE REMOTE SENSING DATA TO THE STUDY OF
THE FEATURES OF THE DESTRUCTION OF SNOW-ICE COVER OF
LAKE BAIKAL AND LAKE HOVSGOL**

В рамках настоящего исследования по данным радиометра AVHRR проанализирована внутригодовая и межгодовая изменчивость в сроках таяния и разрушения снежно-ледяного покрова озере Байкал и озере Хубсугул. Изучена связь сроков очищения ото льда данных водоемов с параметрами циркуляции атмосферы.

Ключевые слова: оз. Байкал, оз. Хубсугул, данные радиометра AVHRR, ледовый режим, АО, НАО.

Intra-annual and inter-annual variability of the timing of the Lake Baikal and Lake Hovsgol snow-ice cover melting and destruction has been analyzed using AVHRR data in this research. The relation of the timing of the clearance of ice of these water-bodies with the parameters of atmospheric circulation has been studied.

Key words: Lake Baikal, Lake Hovsgol, AVHRR data, ice regime, AO, NAO.

Байкал и Хубсугул — крупные пресноводные озера, котловины которых имеют тектоническое происхождение и являются элементами Байкальской рифтовой зоны. Оз. Хубсугул расположено на севере Монголии примерно в 200 км к юго-западу от оз. Байкал [12]. С Байкалом оз. Хубсугул связано реками Эгийн-Гол и Селенгой.

Площадь зеркала оз. Байкал оценивается по современным данным в 31722 км² [1], площадь водной поверхности оз. Хубсугул составляет около 2760 км² [11].

При изучении оз. Байкал и оз. Хубсугул, которые имеют значительные размеры акваторий, данные дистанционного зондирования дают возможность наблюдать за состоянием всего водоема и получать качественно новую пространственно-временную информацию о происходящих в озерах процессах, что невозможно обеспечить с применением только судовых и экспедиционных исследований.

В рамках данного исследования производилось картографирование и анализ состояния снежно-ледяного покрова в период его таяния и разрушения в пределах акваторий оз. Байкал и оз. Хубсугул с применением спутниковой информации.

Так как озера могут рассматриваться как индикаторы, реагирующие на изменения климата и антропогенную деятельность [4], изучение ледовых явлений на оз. Байкал и оз. Хубсугул имеет как научное, так и практическое значение.

С точки зрения научных исследований, получение информации о динамике ледяного покрова важно для изучения изменений регионального и локального климата, так как характеристики ледяного покрова чувствительны к климатическим изменениям [8, 14].

С другой стороны ледяной покров, являясь продуктом взаимодействия атмосферы и гидросферы, сам оказывает существенное влияние на условия формирования энергетических потоков в системе «водоем-атмосфера», препятствует ветровому перемешиванию и определяет своеобразие всех элементов режима изучаемого водоема [6]. Ввиду этого изучение динамики ледяного покрова водоемов является необходимым звеном при изучении цепи явлений, протекающих в водоеме [2].

С практической точки зрения картографическая информация о ледовой обстановке необходима для планомерного проведения навигации и перевозки грузов по льду [2].

В рамках данного исследования для изучения особенностей ледово-термического режима были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2013 г., отобранные из архива телеметрии Центра космического мониторинга Института солнечно-земной физики СО РАН. Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение.

Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полученное изображение охватывает полосу земной поверхности шириной 2700 км по трассе движения спутника, что обеспечивает полный обзор акваторий изучаемых водных объектов за один пролет.

В период очищения озера ото льда использование данных радиометра AVHRR позволяют определять стадии разрушения снежно-ледяного покрова и чистую воду. В данной работе при оценке стадий таяния и разрушения снежно-ледяного покрова на оз. Байкал и оз. Хубсугул за основу была принята классификация, приведенная В.М. Мишоном [7] (табл. 1).

Для картографического отображения ледовой обстановки в период разрушения льда в работе применяются картознаки качественного фона на основе разработанной автором палитры.

В качестве примера приведены полученные в результате анализа спутниковых изображений AVHRR карты, на которых отображено состояние снежно-ледяного покрова по степени его стаивания и разрушения на оз. Байкал в 2010 г. (рис. 1), 2011 г. (рис. 2) и 2012 г. (рис. 3) и оз. Хубсугул в те же годы: 2010 г. (рис. 4), 2011 г. (рис. 5) и 2012 г. (рис. 6).

Данные картографические изображения позволяют отчетливо проследить динамику разрушения ледяного покрова в указанные годы.

В целом процессы разрушения льда на оз. Байкал и оз. Хубсугул протекают в разные сроки. Продолжительность периода исчезновения льда зависит от местоположения водоемов, погодных условий, строения и размеров водных объектов [5]. Несмотря на то, что оз. Хубсугул находится в более низких широтах, чем оз. Байкал, разрушение льда на Хубсугуле происходит позднее, чем на Байкале. Это в том числе обусловлено тем, что оз. Хубсугул расположено на высоте 1188 м над уровнем Байкала.

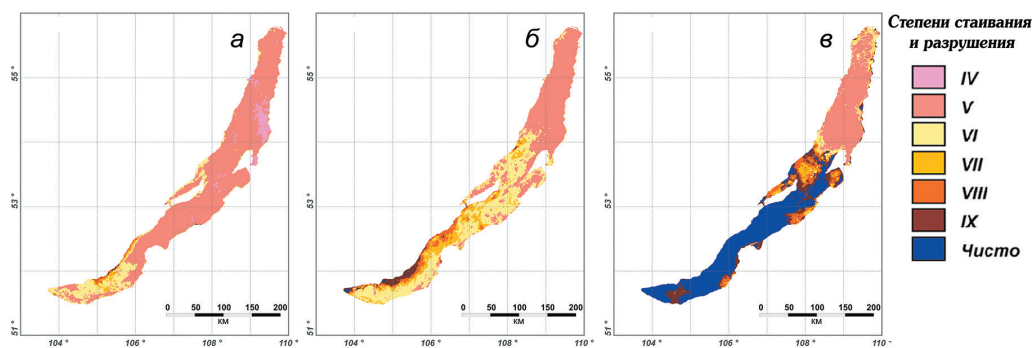


Рис. 1. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени стаивания и разрушения в 2010 г.:
a — 10 мая; *б* — 17 мая; *в* — 25 мая (IV–IX см. в табл. 1)

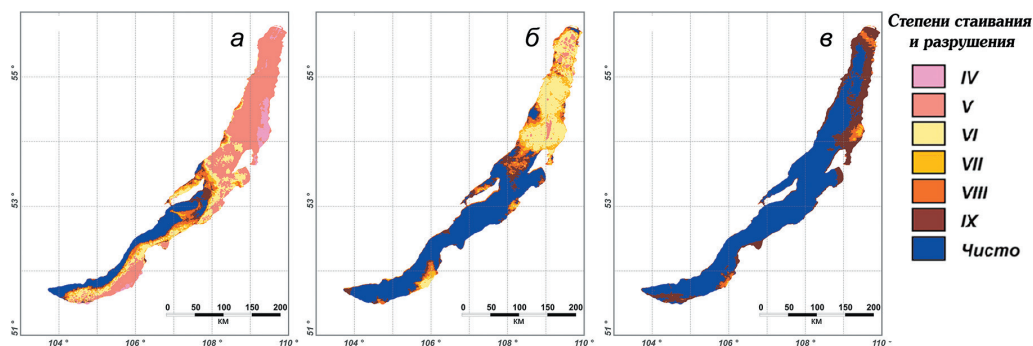


Рис. 2. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени стаивания и разрушения в 2011 г.:
a — 2 мая; *б* — 15 мая; *в* — 24 мая (IV–IX см. в табл. 1)

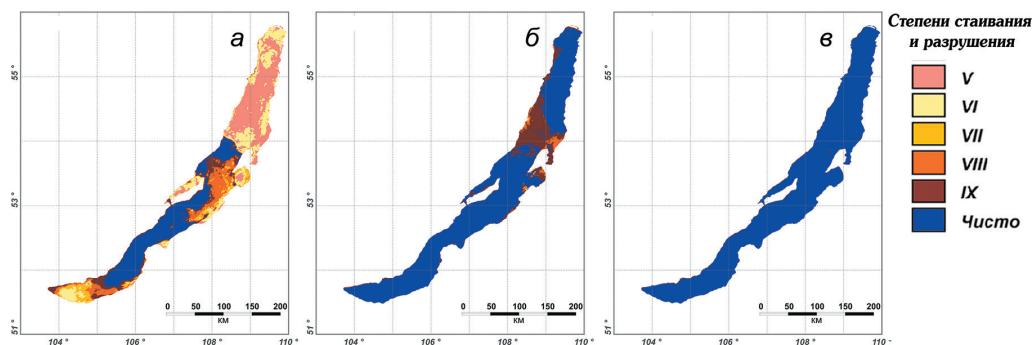


Рис. 3. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени стаивания и разрушения в 2012 г.:
a — 4 мая; *б* — 14 мая; *в* — 25 мая (V–IX см. в табл. 1)

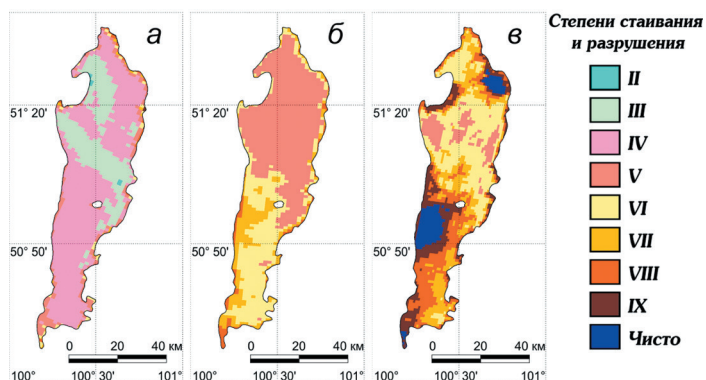


Рис. 4. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени стаивания и разрушения в 2010 г.:
а — 3 июня; б — 13 июня; в — 16 июня (II–IX см. в табл. 1)

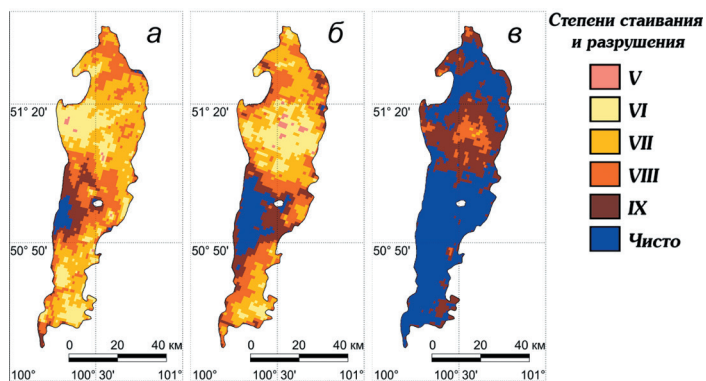


Рис. 5. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени стаивания и разрушения в 2011 г.:
а — 5 июня; б — 10 июня; в — 13 июня (V–IX см. в табл. 1)

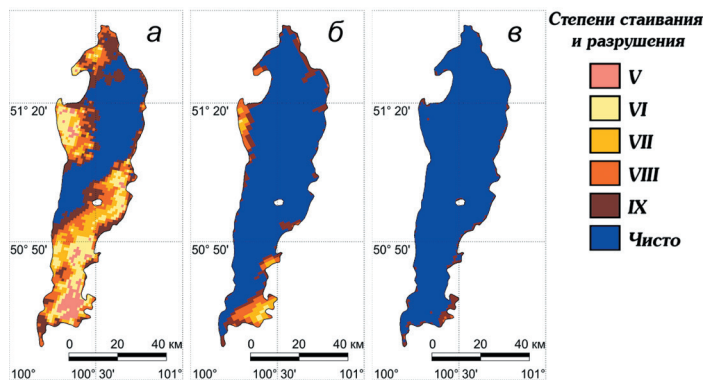


Рис. 6. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Хубсугул по степени стаивания и разрушения в 2012 г.:
а — 6 июня; б — 9 июня; в — 12 июня (V–IX см. в табл. 1)

Таблица 1

**Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности
при различных степенях ее стаивания и разрушения**

Степень стаивания и разрушения	Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности
I	Снег чистый, плотный, мелко- и среднезернистый, сухой
II	Снег чистый, слабо увлажненный (начало таяния), плотный; местами появляются отдельные серые пятна (более увлажненные участки)
III	Снег чистый, днем местами появляется вода; количество серых пятен составляет 10–20 % видимой поверхности
IV	Снег чистый, влажный, начинает оседать, переходит в крупнозернистый; на поверхности около 30 % серых и темных пятен
V	Снег влажный, местами загрязнен, на льду под снегом вода; количество белых (чистый снег), серых и темных пятен одинаково
VI	Снег интенсивно тает, на льду вода, снежная каша. Сплоченность составляет от 7 до 10 баллов
VII	Снег крупнозернистый, сохраняется на отдельных местах; ледяная поверхность шероховатая, серых или темных оттенков. Сплоченность составляет 7 баллов
VIII	Снежная каша, лед темный, шероховатый, отдельные участки серого цвета. Сплоченность составляет от 5 до 7 баллов
IX	Лед темный, распадается на вертикальные столбики, вода на льду. Сплоченность составляет 5 баллов

При очищении указанных водоемов ото льда наблюдается значительная межгодовая изменчивость, что можно видеть на представленных картографических изображениях.

Различия наблюдаются как в сроках взлома льда и очищения от него озера, так и в пространственном распределении льда в разных стадиях разрушения по акватории.

В 2010 г. наблюдался наиболее поздний сход льда за период исследования как на оз. Байкал, так и на оз. Хубсугул. В 2011 г. сроки очищения акваторий ото льда близкие к средним. В 2012 г. наблюдается значительно более ранний сход льда, как на Байкале, так и на Хубсугуле.

На рис. 7 приведен ход изменчивости сроков очищения ото льда оз. Хубсугул (за период с 1998 по 2012 г.) и Южного, Центрального и Северного бассейнов оз. Байкал (за период с 1998 по 2013 г.), определенных по данным AVHRR.

В целом для оз. Хубсугул сроки очищения акватории ото льда изменялись от 5 июня в 2004 г. до 24 июня в 2010 г. Для Южного бассейна оз. Байкал сроки за период исследования варьировали от 7 мая в 2007 г. до 4 июня в 2010 г., для Центрального бассейна — от 13 мая в 2007 г. до 7 июня в 2010 г., для Северного бассейна — от 20 мая в 2007 г. до 13 июня в 2010 г.

Такое различие в сроках разрушения льда и очищения от него акваторий озер может объясняться тем, что изучаемые водоемы, расположены почти в центре азиатской части Евразийского континента, испытывают существенное влияние климата, в том числе проявляющееся в изменениях процессов теплообмена озер с атмосферой.

Структура колебания климата в регионе оз. Байкал и оз. Хубсугул, как и во всем Северном полушарии, включает крупномасштабные аномалии, вызываемые изменением циркуляции атмосферы [10].

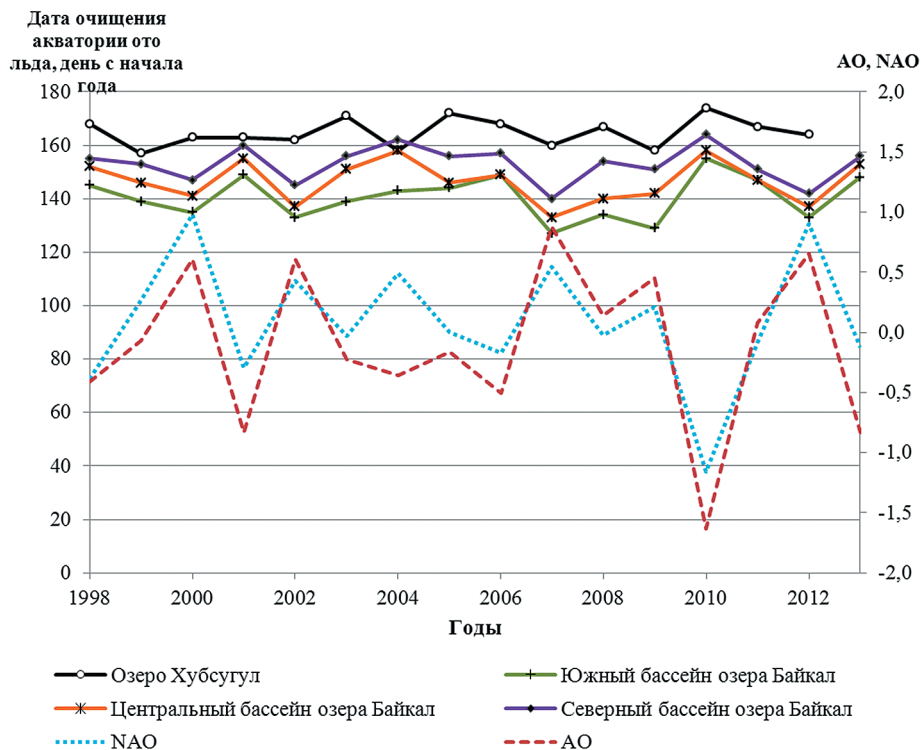


Рис. 7. Ход изменчивости сроков очищения оз. Хубсугул, Южного, Центрального и Северного бассейна оз. Байкал ото льда по данным AVHRR, в сопоставлении с ходом параметров АО и NAO, осредненных за период с ноября по май

В рамках данного исследования была проанализирована связь сроков очищения водоемов ото льда с показателями активности атмосферной циркуляции, с которыми связана адвекция тепла и влаги в район оз. Байкал и оз. Хубсугул с воздушными массами из Атлантического океана, и в качестве которых в рамках данного исследования используется индекс Северо-Атлантической осцилляции NAO (North Atlantic Oscillation), а также индекс Арктической осцилляции АО (Arctic Oscillation). В России зависимость параметров ледового режима крупных внутренних водоемов от значений указанных телеконнекционных индексов исследовалась в работах С.Г. Каретникова и М.А. Науменко [13], М.Н. Шимараева [9] и др.

В ходе анализа данных NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration — аббревиатура Национального управления США по исследованию океана и атмосферы)

по индексу АО и индексу NAO было выявлено, что изменения активности обоих индексов находят отражение в динамике ледового режима оз. Байкал и в меньшей степени оз. Хубсугул.

Это может объясняться тем, что Хубсугул расположен с одной стороны в более южных широтах, а с другой стороны находится в районе с более ярко выраженным континентальным климатом и отличающимся местной спецификой погодных явлений.

Для оз. Байкал более выражена связь ледовых явлений с индексом АО, для оз. Хубсугул более выражена связь с индексом NAO, что также может объясняться расположением оз. Байкал в более северных широтах.

Наиболее выраженная связь сроков очищения оз. Байкал ото льда наблюдается со средними значениями индексов АО и NAO за периоды с ноября по май, а для оз. Хубсугул — с октября по май, что хорошо согласуется с внутригодовым распределением значений температуры воздуха в соответствующих районах.

В связи со сказанным выше в табл. 2 приведены значения коэффициента корреляции между сроками очищения акватории ото льда и индексами АО и NAO, осредненными для случая оз. Хубсугул за период с октября по май, а для Байкала — за период с ноября по май.

Таблица 2

Значения коэффициента корреляции между сроками очищения акватории ото льда и параметрами циркуляции атмосферы АО и NAO

Акватория	АО	NAO
Оз. Хубсугул	–0,592	–0,692
Южный бассейн оз. Байкал	–0,910	–0,755
Центральный бассейн оз. Байкал	–0,903	–0,664
Северный бассейн оз. Байкал	–0,900	–0,729

В работе установлено, что для достаточно большого водного объекта с площадью зеркала в тысячи квадратных километров связь с показателями атмосферной циркуляции сроков разрушения льда на всей исследуемой акватории будет значительно более выраженной, чем при использовании информацией о ледовых явлениях, собранной на одной из гидрометеостанций, расположенной в непосредственной близости от изучаемой акватории, как, например, приведено в работе [9].

Что можно объяснить более явным вкладом от влияния местных факторов при анализе информации по отдельному посту и соответственно меньшей связью ледовых явлений, зафиксированных на гидрометеостанции, с параметрами крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Полученные в ходе исследования материалы могут быть использованы для уточнения информации о ледовом режиме оз. Байкал и в особенности оз. Хубсугул, при разработке прогнозов сроков очищения акваторий ото льда, для анализа влияния изменения климата на параметры ледового режима изучаемых водоемов и решения ряда других фундаментальных и прикладных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-31100) и программы стратегического развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» на 2012–2016 гг.

Литература

1. *Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., Шерстянкин П.П.* Гидрографические исследования озера Байкал и их использование в цифровой картографии. // Навигация и гидрография, 2005, вып. 20–21, с. 77–86.
2. *Верещагин Г.Ю.* Работы Байкальской лимнологической станции по изучению ледяного покрова Байкала. // Труды Байкальской лимнологической станции, 1939, т. 9, с. 5–8.
3. *Граньков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. — М.: Физматлит, 2004. — 168 с.
4. *Догановский А.М.* Уровненный режим озер — интегральный показатель климатических и экологических изменений. // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana), 2007, № 1, с. 103–110.
5. *Догановский А.М.* Гидрология суши (общий курс). — СПб.: РГГМУ, 2012. — 524 с.
6. *Доронин Ю.П.* Взаимодействие атмосферы и океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 288 с.
7. *Мишон В.М.* Гидрофизика. — Воронеж: изд-во ВГУ, 1979. — 308 с.
8. *Солощук П.В.* Изменение климата и ледовых условий водной системы Финский залив-Невская губа-река Нева в осенне-зимний период за последние 15 лет. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 14, с. 34–41.
9. *Шимараев М.Н.* Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала. // География и природные ресурсы, 2007, № 4, с. 54–60.
10. *Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н.* Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.). // География и природные ресурсы, 2010, № 3, с. 62–68.
11. *Enkhtaivan S., Soldán T.* Mayflies of the Lake Hovsgol Region, Mongolia. // International Advances in the Ecology, Zoogeography, and Systematics of Mayflies and Stoneflies. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 2008, p. 103–115.
12. *Goulden C.E., Boldgiv B.* Lake Hövsgöl, Mongolia: The Blue Pearl of Mongolia. // SIL News, 2002, vol. 36, p. 1–4.
13. *Karetnikov S., Naumenko M.* Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years. // Hydrological Processes, 2011, vol. 25, p. 2859–2867.
14. *Robertson D.M., Ragotskie R.A., Magnuson J.J.* Lake ice records used to detect historical and future climatic changes. // Climatic changes, 1992, № 21, p. 407–427.

Б.В. Фащевский

О ДОПУСТИМЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ В РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

B.V. Fashevsky

ADMISSIBLE TRANSFORMATIONS IN RIVER ECOSYSTEMS

Рассмотрены проблемы строительства плотин, водохранилищ и регулирования водного режима. Показано, что такие мероприятия нанесли непоправимый ущерб речным экосистемам, особенно мигрирующим рыбам и пойменным лугам. Нормирование качества водных ресурсов крайне примитивно и требует новых разработок. Предлагается срочно разработать государственную программу возрождения речных экосистем путем постепенной замены гидроэнергетики на тепловую и атомную.

Ключевые слова: преобразования природы, плотины, водохранилища, каналы, мигрирующие рыбы.

It is considered the problems of construction of dams, reservoirs and water regime regulating. It is shown that such activities have caused irreparable damage to river ecosystems, especially migratory fish and floodplain meadows. Rate-setting of the quality water resources is extremely primitive and requires new developments. It is invited urgently to develop the state program revival of river ecosystems by gradual replacement of hydro-power on thermal and nuclear energy.

Key words: transformation of nature, dams, reservoirs, canals, migratory fish.

Строительство плотин, водохранилищ и регулирование водного режима

В 30–40-е гг. прошлого столетия в Советском Союзе был разработан сталинский план преобразования природы, в котором ключевую роль играло развитие гидроэнергетического потенциала страны путем строительства плотин, водохранилищ и зарегулирования речного стока с целью выработки максимального количества электроэнергии. Люди забыли, что реки не являются только транзитными системами, а служат многим животным и растениям их домом, т.е. являются, по сути, средой их обитания, или экосистемами. Жизнь речных экосистем характеризуется следующими видами живых организмов, которые подробно описаны в [2, 3].

- 1) вирусы, бактерии, грибы и водоросли;
- 2) высшая водная и околотовдная растительность;
- 3) беспозвоночные, включают в себя как простейших, так и коловраток, червей, низших ракообразных, личинок насекомых и моллюсков, жуков и т.п.;
- 4) рыбы, земноводные и рептилии;
- 5) полуводные и водные млекопитающие;
- 6) водоплавающие и околотовдные птицы.

По местообитанию в водных экосистемах выделяют также следующие группы организмов:

- 1) обитатели дна-т растения и животные — бентос;
- 2) обитатели толщи воды — фито и зоопланктон;
- 3) обитатели поверхности вод.

В эти же годы появляется новая идея — Единая воднотранспортная система СССР, которую и начали осуществлять путем строительства каналов. Кому они теперь нужны, когда скорости товарных составов составляют в Западной Европе 150–200 км/час. Все это строительство плотин, водохранилищ, каналов и многолетнее регулирование речного стока ведут к деградации водных экосистем, но самым страшным является строительство плотин и водохранилищ, которые перегораживают реки и не пропускают проходных и полупроходных видов рыб, мигрирующих в реки, на нерестилища и обратно. А так как большая часть рек в бывшем Советском Союзе относится к рекам, где обитают проходные и полупроходные виды рыб, то становится понятным, что основной удар был нанесен по ним. К ним относятся: осетровые, лососевые, рыбец, шемая. К полупроходным относятся также судак, жерех, вобла, тарань, сазан, лещ и значительная часть сиговых. Кроме эффекта перегораживания, для проходных и полупроходных видов является, важен субстрат нерестилищ, им нужен песчано-галечный грунт для нереста, а что мы имеем в водохранилищах — полуметровую толщу ила!

Отсюда становится понятным, что же натворили гидроэнергетики, практически все популяции проходных и полупроходных видов рыб были уничтожены, но особенно пострадали осетровые, а именно, белуга, рыба, достигающая 1,5 т веса и дающая 200 кг икры! Кстати, в США действует план сноса большей части плотин на реках страны.

Чрезмерное зарегулирование рек, в погоне за получением большего энергетического эффекта путем увеличения напора, приводят к нарушению всего природного комплекса экосистемы реки.

В верхнем бьефе это выражается подтоплением ранее незатапливаемых территорий, абразионными процессами в новой береговой зоне, изменением гидробиологического режима этого участка реки (интенсивное развитие водорослей, особенно сине-зеленых, формирование бескислородных зон в водохранилище и т.п.).

В нижнем бьефе отмечается нарушение гидрологического режима нерестовых угодий в пойме и основном русле, изменением термического и ледового режима, режима наносов и русловых процессов, взаимосвязи солевого режима моря и реки и т.п.

Дополнительным фактором изменения водного режима является увеличение потерь на испарение с водной поверхности водохранилища. Прямое изъятие водных ресурсов из водотоков и водоемов также нарушает их экосистемы, однако для рек это воздействие проявляется на участках, расположенных ниже створов изъятия вод.

В результате создания каскада крупных водохранилищ и ирригационных систем река Колорадо в США была истощена до такой степени, что в устье приходит лишь 1,5 км³ грязных сточных вод из более чем 20 км³ годового стока реки по выходе из гор.

В ряде случаев, когда водохранилища расположены в верхних участках рек могут быть сделаны попуски в нижние бьефы и обеспечить нерест рыбы и воспроизводство пойменной растительности. Опыт таких попусков на Бухтарминской ГЭС показал свою эффективность [2].

Исследования показали, что для сохранения водных экосистем необходимо ограничить допустимую степень регулирования стока определенными рамками в виде соответствующей величины, названной экологическим стоком [2, 3].

Термин «экологический сток» подразумевает внеэкономический подход. Экологический сток учитывает фазы формирования водного режима и включает: весеннее половодье, дождевые паводки, летнюю и зимнюю межень. Экологический сток является интегральной характеристикой, учитывающей весь природный комплекс речных экосистем — рыбу, луга, леса, земноводных и рептилий, птиц, млекопитающих. Однако в ряде случаев мы можем выполнять и расчеты, исходя из целесообразности сохранения того или иного компонента природы. Так, для полугорных и горных рек Дальнего Востока России, а также западного побережья Северной Америки, где пойма неразвита, а сама река используется только как нерестовое угодье для тихоокеанских лососей. В результате отпадает необходимость в учете факторов, связанных с поймой (луга, леса, околотоводные животные) и в этом случае целесообразно выполнять расчет рыбохозяйственного стока, который обеспечит воспроизводство только рыбы определенных ценных видов.

В ряде случаев возникает необходимость обеспечить воспроизводство только пойменных лугов или лесов, а другие элементы природы не нуждаются в охране, в этом случае целесообразно говорить о сельскохозяйственном, или луговом стоке!

Анализ кривых связей урожайности пойменных лугов, воспроизводства фитопланктона и зоопланктона, донных организмов, сеголетков рыбы, околотоводных млекопитающих и птиц с вышеуказанными гидрологическими характеристиками показывает, что минимум биопродуктивности приходится на очень многоводные и очень маловодные годы. А по мере приближения к среднему по водности году воспроизводство всех организмов нарастает и достигает максимума в зоне 60–40 % обеспеченности [2].

Слабое затопление или незатопление поймы в весенне-летний период приводит к снижению площади кормовых угодий и кормовой базы всех видов рыб (так как пойма является основной «фабрикой» кормов всех водных организмов), что ведет к резкому снижению их воспроизводства. Маловодье осенне-зимнего периода нарушает условия нереста литофильных рыб, особенно в период ледостава отмечаются заморы и перемерзание нерестовых бугров осенне-нерестующих видов. Отсутствие затопления поймы снижает урожайность луговой растительности и ухудшает условия воспроизводства водоплавающих птиц и млекопитающих из-за снижения кормовой базы и условий гнездования.

В многоводные годы, кроме нарушения нормального периода вегетации растений и условий гнездования околотоводных животных из-за продолжительного затопления и формирования высоких скоростей течения на поверхности поймы. Кроме того, в тех случаях, когда растения еще не начали вегетировать, суглинистые и глинистые наносы, подсыхая и твердея, образуют плотную корку, которая препятствует выходу растений на поверхность. В такие годы снижение воспроизводства рыбы происходит за счет нарушения кладок икры, как фитофильных видов на пойме (за счет размыва и заиливания), так и литофильных — в русле (за счет размыва кладок).

В многоводные годы увеличивается содержание взвешенных минеральных веществ, которые попадают на жабры и в пищеварительный аппарат рыб и подавляют их жизнедеятельность.

Планктонные организмы, в результате засорения их кишечника неперевариваемыми частицами, увлекаются в осадок и погибают.

В маловодные годы прослеживается очень сильное сокращение урожайности молоди за счет уменьшения площадей нерестовых угодий и объема воспроизводства кормов для ихтиофауны. Кроме того, в маловодные годы, когда рыба концентрируется в небольшом объеме воды, большое количество молоди и кладки икры выедается сорной рыбой.

Нижний предел допустимых изменений может расцениваться по степени равноущербности компонентам живой природы в расчетные годы. Известно, что в период половодья в годы 95 % обеспеченности поймы большинства рек не затопляются. Аналогичная картина наблюдается и в половодье в годы 99 % обеспеченности.

В зимний период, при ледоставе на многих реках содержание кислорода падает ниже критических отметок (3–2 и менее мг/л), что вызывает заморы большинства водных организмов, и прежде всего, рыб. Так, на огромной реке Амур в створе у города Хабаровска в год 95 % обеспеченности зимнего стока содержание растворенного кислорода падает ниже 3 мг/л. А на реке Припять у г. Мозыря такое же снижение кислорода отмечается даже в год 90 % обеспеченности! Очень часто на малых нерестовых реках характерно снижение уровней до такой степени, что ледяной покров смерзается с перекатами и вызывает гибель отложенных кладок икры лососевых рыб. Машинные эксперименты на конкретных реках позволили получить важные выводы об устойчивости речных экосистем:

- речной сток, подверженный воздействию хозяйственной деятельности (регулирование и изъятие стока, оросительные и осушительные мелиорации, сведение лесов на водосборе и др.) несет в себе большую смысловую нагрузку, чем только количество воды, так как с изменением расходов и уровней воды меняются многие физические и химические характеристики. Поэтому оставляемый в реке экологический, рыбохозяйственный, сельскохозяйственный или луговой и др. стоки служат комплексным показателем, учитывающим все гидрологические характеристики (термический и ледовый режим, растворенные вещества и взвешенные и донные наносы, кислородный режим и др.).
- оставляемый в речных экосистемах экологический сток не может по условиям охраны природы приниматься постоянным, а должен изменяться в соответствии с естественными колебаниями от определенного минимума до определенного максимума во времени внутри года.

Для практических расчетов экологического и свободного речного стока рекомендуется следующий алгоритм расчета:

1. Нижний предел экологического стока описывается гидрографами естественного стока 99 % обеспеченности, т.е. вековым запасам водных ресурсов в речном бассейне.
2. Верхний предел экологического стока описывается гидрографами 50 % обеспеченности, т.е. в годы, когда наблюдается максимум воспроизводства живой природы (травостой лугов, рыба, птицы и млекопитающие). При этом как раз наблюдается руслоформирующий расход (соответствующий максимуму 50 % обеспеченности), который, поддерживает устойчивость русла реки, как ландшафтной единицы.

3. Принимая ущербность экосистеме равной в год 95 и 99 % обеспеченности равной, экологический сток в год 95 % обеспеченности принимается равным естественному стоку в год 99 % обеспеченности.
4. Величина естественного годового стока 50 % обеспеченности принимается равной остаточному экологическому стоку 25 % обеспеченности. По двум точкам проводится логнормальная кривая, позволяющая получить весь диапазон расчетных значений экологического стока.
5. На основе матриц естественного среднемесячного стока рассчитывается его внутригодовое распределение в годы различной обеспеченности. Относительное (в долях от единицы) расчетное внутригодовое распределение экологического стока принимается равным распределению естественного стока той же смежной обеспеченности. Путем умножения годового экологического стока на относительную величину месячного стока можно получить внутригодовое распределение экологического стока по месяцам.

Проблемы нормирования допустимой степени загрязнения речного стока

Суть нормирования качества воды в водных объектах в системе государственного управления состоит в установлении допустимых значений поступления загрязняющих веществ по физическим, химическим, бактериологическим и органолептическим критериям, а также на основе методов биоиндикации и биотестирования. Эти критерии должны обеспечить здоровье населения, условия сельскохозяйственного и промышленного производства, а также благополучие самого водного объекта, когда обеспечивается устойчивое функционирование естественных водных и околотоводных экосистем. В настоящее время наибольшее распространение в качестве норм допустимого загрязнения получили методы, базирующиеся на так называемых показателях предельно допустимых концентраций (ПДК) химических веществ в воде, физических ингредиентов (минеральных частиц, радиоактивного загрязнения, тепла или холода) и микроорганизмов (коли-индекс, коли-титр и др.), а также индекса загрязненности воды (ИЗВ), применяемого, кстати, только на территориях бывшего Советского Союза.

Нормы качества речных вод включают:

- перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) нормированных веществ в воде водных объектов, используемых для хозяйственно-питьевых и коммунально-бытовых нужд населения и рыбохозяйственных целей;
- в перечнях ПДК должны быть указаны: полное наименование вещества и его синонимы (если они существуют). Лимитирующий признак вредности, поле опасности и нормативное числовое значение с указанием единицы измерения;
- при отсутствии ПДК для веществ, содержащихся в сточных водах, проектируемых или строящихся предприятий должны устанавливаться ориентировочные допустимые уровни (ОДУ) содержания этих веществ в воде, разработанные на основе расчетных и экспресс — экспериментальных методов прогноза токсичности;
- перечни нормируемых веществ и величины их ПДК в воде водных объектов устанавливаются Министерством здравоохранения и Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды;

- методики анализа содержания веществ и микроорганизмов в поверхностных и сточных водах разрабатываются специализированными организациями и утверждаются и рекомендуются к применению Минприроды и Минздравом.

В ряде случаев, при оценке воздействия на качество воды поступления в водные объекты нескольких нормируемых веществ, с одинаковыми лимитирующими признаками вредности сумма отношений концентраций ($C_1, C_2, \dots C_n$) каждого из веществ в контрольном створе к соответствующему ПДК не должна превышать единицы.

$$\frac{C_1}{MAC_1} + \frac{C_2}{MAC_2} + \dots + \frac{C_n}{MAC_n} \leq 1,0, \quad (1)$$

где $C_1, C_2, \dots C_n$ — измеренные концентрации загрязняющих веществ; $MAC_1, MAC_2, \dots MAC_n$ — максимально допустимая концентрация загрязняющего вещества.

При сбросе сточных вод, используемых для хозяйственно-питьевых и коммунально-бытовых целей, нормы качества воды в реках и озерах должны выдерживаться в реках на участках 1 км ниже сброса, а в озерах и водохранилищах — на акватории в радиусе 1 км от пункта водопользования с учетом процессов самоочищения на этом участке водного объекта

При сбросе сточных вод, влияющих на состояние рыбопромысловых рек и озер, нормы качества должны соблюдаться в пределах всего рыбохозяйственного участка, но не далее чем в 500 м от места сброса сточных вод.

В случае одновременного использования водного объекта или его участка для различных нужд населения, промышленности, сельского и рыбного хозяйства к составу и свойствам воды предъявляются наиболее жесткие нормы из числа установленных

Для уникальных водных объектов, имеющих экологическую, историческую или культурную ценность, которым придается статус заказника, заповедника или национального парка, могут устанавливаться особые требования к качеству воды и к водному режиму объекта.

В целом можно отметить, что на практике нормирование допустимой степени загрязнения водотоков и водоемов базируется на санитарно-гигиенических нормативах, учитывающих концентрацию загрязняющих веществ в растворенном состоянии в водной среде. Такой подход исходит из принципа приоритетного обеспечения безопасности человека.

Близкими по смыслу являются и рыбохозяйственные нормативы, причем часто более строгие по сравнению с санитарно-гигиеническими. Такое нормирование позволяет, в некоторой степени контролировать ситуацию в водных объектах, однако не решает задачи экологического нормирования, т.е. не охватывает все звенья экологической системы водных объектов.

Анализ различных нормативов качества вод в водотоках и водоемах показывает, что в настоящее время состояние нормативно-методических материалов не соответствует запросам практики и не имеет удовлетворительного научного обоснования.

В большинстве стран бывшего СССР широко используется такой показатель качества, как индекс загрязненности воды (ИЗВ), где в качестве из шести приоритетных загрязняющих веществ используется кислород!?! Каким образом главный окислитель всех органических веществ попал в число загрязняющих веществ, остается загадкой! Но учитывая, что кислородный режим рек обычно хороший, то получается, что введение его в этот индекс улучшает показатель ИЗВ.

Нормирование ПДК на новые появляющиеся загрязняющие вещества отстает от их количественного роста и поступления в водные объекты. В последних перечнях ПДК, разработанных для водных объектов различных видов водопользования содержится около 1500 наименований, в то время как число веществ, поступающих в водные объекты, постоянно растет и оценивается миллионами. Контролируется же сейчас около 70 веществ, что соответствует 5 % от последнего перечня!

Одним из главных последствий плохого качества водных ресурсов в настоящее время на реках бывшего СССР является принятие в 70-е гг. прошлого столетия крайне ошибочного подхода при использовании зависимости [2]. Суть вредности этой зависимости заключается в том, что она априори позволяет сбрасывать в чистые реки сотни и тысячи тонн загрязняющих веществ (в зависимости от величины стока), лишь бы не было превышено ПДК и в формуле сумма не превысила единицы!

Практический опыт показывает, что для предотвращения разрушения водных экосистем в формулу (2) в знаменатель необходимо подставлять фоновую концентрацию загрязняющего вещества до начала ее загрязнения или из верховьев реки, где сохранились естественные природные условия.

Еще одним недостатком существующей системы нормирования качества вод является неучет того факта, что значительная часть загрязнений аккумулируется в донных отложениях, и затем, при прохождении половодий и паводков, а также штормов на озерах и водохранилищах, они выносятся на поверхность, отравляя воду и все живое.

Большое количество биогенных веществ, тяжелых металлов и пестицидов накапливается в водных растениях и животных организмах, которые, в свою очередь, отмирая в соответствующие периоды года (а сине-зеленые водоросли и в процессе их жизнедеятельности), резко ухудшают качество вод.

Еще более страшным является неучет явления биоконцентрации при передаче загрязнений по трофическим цепям. Нормирование на основе ПДК не учитывает антагонизма и синергизма действия отдельных химических веществ. Например, малые концентрации меди стимулируют разложение нестойкой органики, а большие — наоборот, угнетают. Кроме того, санитарно-гигиенические и рыбохозяйственные ПДК характеризуют качество вод в водотоках и водоемах лишь в момент взятия пробы воды! А что же произойдет в водном объекте через день, неделю, месяц, год и так далее они не учитывают.

Действующими нормативами концентрации отдельных загрязняющих веществ регламентируются без учета особенности их влияния на конкретные водные объекты, скорости их распада и превращения в водной среде. При установлении пороговых уровней загрязняющих веществ необходим учет региональных физико-географических особенностей водных объектов, а не так обобщенно, как это принято сейчас.

Даже в тех случаях, когда химический режим для отдельных водных объектов достаточно хорошо изучен, при нормировании по ПДК его различия не учитываются. Так, ПДК хлоридов и сульфатов составляют соответственно 350 и 500 мг/л для любых водных объектов. Однако, учитывая, что фоновое содержание хлоридов и сульфатов колеблется в широких пределах (от 3 до 500 мг/л), на практике возникают довольно абсурдные ситуации, когда увеличение их концентраций на один или два порядка вызывают стрессовую ситуацию в экосистеме всего речного бассейна, а по нормам у нас все в порядке!

В отрыве от конкретного водного объекта ПДК не может рассматриваться и по причине различной их самоочищающей способности.

Существующая регламентация качества вод с позиций только их пригодности для того или иного вида водопользования не обеспечивает нормативного подхода к качеству вод с позиции благополучия всего речного бассейна. Например, допустимое нормативами содержание нитратов в природных водах в 10 мг/л совершенно не говорит о том, что эвтрофирование не происходит. Ведь идет непрерывный процесс накопления нитратов в экосистеме, и когда он произойдет, сказать трудно. Но то что при таких концентрациях нитратов это произойдет — не вызывает сомнения.

А по фосфору для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водоснабжения качество вообще не нормируется! Хотя научной общественности известно, что именно фосфор является индикаторным веществом при оценке эвтрофирования водотоков и водоемов.

Создание единых ПДК и дифференцирование их по видам водопользования не способствовало коренному улучшению качества вод, а наоборот, дезорганизовало наработанный многолетний опыт и привело к ухудшению экологической обстановки в речных бассейнах.

Введение ограничений на поступление в водные объекты предельно-допустимых сбросов (ПДС) загрязняющих веществ на основе ПДК путем пересчета их концентрации в реке на объем годового стока различной обеспеченности привело к абсурду! В результате оказалось, что в чистые реки (например, Ангара) можно сбрасывать десятки и сотни тонн загрязняющих веществ и концентрации их в реке будут находиться в пределах ПДК!

Большое влияние на качество вод оказывает такая важная характеристика, как нарушенность природных ландшафтов в речном бассейне, что подразумевает урбанизированность территорий, распаханность и интенсификация сельскохозяйственного производства, степень мелиорированности, горные работы и т.п. Для обеспечения сохранения экологического равновесия в речных бассейнах необходимо обеспечение оптимального соотношения леса, лугов, пахоты и урбанизированности территорий.

Экологическим критерием в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства должен стать не показатель внесения удобрений на единицу площади, а расход элементов питания на единицу продукции, содержащихся в этих удобрениях.

Значения ПДК, характеризуя токсичность компонентов, совершенно не учитывают их каталитическую активность при процессах самоочищения. Так, например, ПДК меди в три раза больше ПДК железа, а каталитическая активность

меди в 2000 раз превышает каталитическую активность железа. Медь подавляет скорость процессов с участием серы, а сера, в свою очередь, влияет на каталитическую активность марганца. Эта сложная система взаимодействия не учитывается при использовании ПДК.

Большие надежды по нормированию качества воды возлагались на применение методов биоиндикации и биотестирования. К сожалению, они не оправдались. Как отмечают В. Байчоров и др.[1] попытки разработать универсальные биотические индексы, применимые для различных территорий мира, завершились провалом. Причиной этого является различие биологического разнообразия водных биоценозов, сформировавшихся в различных природных условиях даже в одном речном бассейне, не говоря уже о различных бассейнах. В настоящее время существуют десятки биотических индексов, основанных на видовом разнообразии, структуре сообщества, индикаторной значимости организмов, имеющих и не имеющих балльную оценку. В настоящее время наиболее широкое распространение получили: индекс Шеннона, индекс Гуднайта-Уитлея, индекс Вудивиса (ТВИ), индексы Симпсона и Бергера-Паркера, которые используют для различных оценочных критериев.

В целом современная система водоохраны, использующая такие базовые понятия, как нормативы предельно-допустимых сбросов (ПДС) и предельно — допустимого вредного воздействия (ПДВВ), является неэффективной по ряду объективных причин:

1. ПДС для конкретного предприятия разрабатывает само предприятие, а органы водоохраны его только утверждают. Совершенно очевидно, что на любом предприятии отсутствует информация о водохозяйственной и экологической обстановке в целом по бассейну (не говоря уже о трансграничных речных бассейнах!), о существующих и перспективных поступлениях загрязняющих веществ от других водопользователей, в том числе от диффузных источников — городские территории, сельскохозяйственные угодья, военные полигоны и др.
2. Нет рабочей методики определения предельно-допустимого сброса, которая позволила бы реально рассчитать этот норматив.
3. Отсутствует научно обоснованная методика выделения приоритетных показателей качества вод (яркий пример — содержание растворимого кислорода в индексе ИЗВ), как для отдельных предприятий, так и для бассейна в целом.
4. Подавляющее большинство водопользователей на территории бывшего СССР не в состоянии обеспечить даже те условные нормативы ПДС, которые они согласовывают с местными органами Министерства природных ресурсов: временно — согласованный сброс, или вообще ничего не согласовывают! Такой подход консервирует современное экологическое состояние водных объектов.

Подводя черту под описанием существующего состояния нормирования, на территориях стран бывшего СССР можно сделать вывод, что она неэффективна из-за множества недостатков, отсюда же следует вывод, что неэффективна и система мониторинга и контроля, построенная на отраслевом принципе. Чтобы сохранить экосистемы рек, система нормирования должна строиться по известному в развитых странах мира принципу — «наилучших экологически достижимых технологий»!

Выводы

1. Необходимо срочно разработать государственную программу возрождения речных экосистем с постепенным переходом от использования гидроэнергетики на другие источники энергии (тепловую, атомную, и др.)
2. Разработать новые принципы мониторинга и нормирования качества водных ресурсов применительно к каждому водному объекту.

Литература

1. *Байчоров В., Тищиков Г., Рощина Н.* Экологические риски и оценка состояния водотоков Беларуси. — Наука, 2006. — 165 с.
2. *Фащевский Б.В.* Основы экологической гидрологии. — Минск: Экоинвест, 1996. — 240 стр.
3. *Fashchevsky B., Fashchevskaya T.* Ecological Hydrology and Water Management. — Germany, Lambert, 2013. — 382 p.

А.М. Догановский, Г.Н. Угенинов

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УСТАНОВЛЕНИЯ НАЧАЛА ОТСЧЕТА ШИРИНЫ ВОДООХРАННОЙ ЗОНЫ НА НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЕРАХ

A.M. Doganovsky, G.N. Ugreninov

DEVELOPMENT OF METHOD FOR ESTABLISHING THE BEGINNING OF REFERENCE FOR WIDTH WATER PROTECTION ZONE UNEXPLORED LAKES

Согласно требованиям Водного кодекса, ширина водоохранной зоны озера отсчитывается от береговой линии — линии уреза при среднемноголетнем уровне воды за безледоставный период. При установлении плановых координат этой линии на неизученных озерах предлагается использовать режимную информацию об изученных озерах-аналогах на территории, однородной по генезису озерных котловин и по факторам стокообразования на озерных водосборах. Установление плановых координат береговой линии предполагает съемку рельефа дна неизученного озера и определение высотной отметки порога слива.

Ключевые слова: озеро, объем, уровень, зарегулированность, пелагиаль, порог слива, береговая линия, динамический объем.

According to the requirements of the Water Code the water protection zone width is measured from the lake shoreline — the line 's edge at average water level for free-ice period. In establishing the plane coordinates of the line on the unexplored lakes are encouraged to use modal information about the studied lakes -analogues in the territory homogeneous on the genesis of lake basins and factors streamflow formation on lake catchments. Establishing plane coordinates shoreline survey suggests unexplored lake bottom topography and determination of the elevation of the threshold drain.

Key words: lake, volume, level, overregulation, pelagial, threshold drain, coastline, dynamic volume.

Разработка методики определения плановых координат береговой линии — важная задача Росгидромета, решаемая во исполнение Постановления Правительства от 19 апреля 2012 года № 350 в рамках Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах».

В соответствии с требованиями Водного кодекса (№ 74-ФЗ) ширина водоохранной зоны (ВЗ), прибрежной защитной (ПЗП) и береговой (БП) полос, отсчитывается от линии уреза при среднемноголетнем уровне воды за безледоставный период. Этот вопрос для рек, в том числе неизученных, прорабатывается на кафедре гидрологии суши в РГГМУ. Однако, в отношении неизученных озер подобных разработок пока нет, хотя решение такой задачи возможно и оно необходимо при использовании этих водных объектов и прилегающих к ним территорий в хозяйственных целях. Решение поставленной задачи сводится к разработке методики определения плановых координат береговой линии, от которой следует вести отсчет при назначении зон со

специальным режимом природопользования. При этом озера могут быть проточными и бессточными, а следовательно и расчетные методики, которые связаны с особенностями водного баланса и форм котловин должны иметь различия. Далее предложены способы определения расчетного уровня проточных озер.

Основной характеристикой, позволяющей количественно идентифицировать неизученное *проточное озеро*, принята норма коэффициента зарегулированности:

$$\bar{k} = \frac{\Delta \bar{V}}{V_{\text{МО}}}, \quad (1)$$

где $\Delta \bar{V}$ и $V_{\text{МО}}$ — норма динамического объема озера за безледоставный период и мертвый объем озера, т.е. объем водной призмы соответственно выше и ниже порога слива; коэффициент k характеризует степень регулирования и, следовательно, степень выравнивания сезонных и многолетних колебаний уровня.

На территории расположения неизученного озера «х» по данным наблюдений на изученных озерах, выделяется однородный по признаку « k » район, включающий озеро «х». При этом совместному рассмотрению подлежат выборки показателей коэффициентов зарегулированности изученных озер

$$k_{ij} = \frac{\Delta V_{ij}}{V_{\text{МО},i}}, \quad (2)$$

где ΔV_{ij} — динамический объем i -го изученного озера при среднем уровне за безледоставный период j -го года; $V_{\text{МО},i}$ — мертвый объем i -го озера.

Граница однородного по признаку « k » района устанавливается по гидролого-морфологическим характеристикам [1] и статистическими методами, например, методом множественной инверсии В.Ф. Крюкова [2]. При этом неизбежно возникает проблема ограниченности сведений об изученных озерах: недостаточность объема выборок; разновременность периодов осреднения и т.д.

В пределах однородного района выбирается озеро-аналог «а», в наибольшей степени схожее с неизученным озером «х» по генезису котловины, ее форме и по размеру. После этого следует определить норму коэффициента зарегулированности озера «а»:

$$\bar{k}_a = \frac{\Delta \bar{V}_a}{V_{\text{МО},a}}. \quad (3)$$

Для получения необходимых расчетных параметров производится съемка неизученного озера «х» и устанавливается отметка его порога слива. В результате имеем:

- кривую объемов пелагиали $V_x = f(z_x)$;
- кривую площадей водного зеркала $\omega_x = f(z_x)$;
- мертвый объем $V_{\text{МО},x}$;
- динамический объем на дату съемки $\Delta V_{x,t}$;

— коэффициент зарегулированности на дату съемки:

$$k_{x,t} = \frac{\Delta V_{x,t}}{V_{MO,x}}. \quad (4)$$

На эту же дату определяется динамический объем и озера-аналога $\Delta V_{a,t}$, а также его коэффициент зарегулированности:

$$k_{a,t} = \frac{\Delta V_{a,t}}{V_{MO,a}}. \quad (5)$$

Оценка среднееголетнего значения коэффициента зарегулированности расчетного озера «х» составляет:

$$\hat{k}_x = \frac{\bar{k}_a \cdot k_{x,t}}{k_{a,t}}. \quad (6)$$

Оценка среднееголетнего динамического объема озера «х» равна:

$$\Delta \hat{V}_x = \hat{k}_x \cdot V_{MO,x}. \quad (7)$$

Оценка среднееголетнего объема пелагиали озера «х» составляет:

$$\hat{V}_x = \Delta \hat{V}_x + V_{MO,x}. \quad (8)$$

Искомая отметка среднееголетнего уровня озера «х» за безледоставный период $\hat{z}_{\text{безлед},x}$ устанавливается по кривой объемов $V_x = f(z_x)$; площадь водного зеркала $\hat{\omega}_{\text{безлед},x}$ определяется по кривой площадей $\omega_x = f(z_x)$.

Плановые координаты береговой линии устанавливаются по картографическим материалам при отметке $\hat{z}_{\text{безлед},x}$. От этой линии и производится расчет площади водно-охранной зоны.

В качестве примера были рассчитаны координаты береговой линии при среднееголетнем уровне за безледоставный период для проточных озер Красное и Отрадное расположенных на Карельском перешейке. Относительная погрешность определения по предлагаемой методике площади зеркала $\hat{\omega}_{\text{безлед},x}$ неизученных проточных озер составила примерно $\delta_\omega = 2,0\text{--}2,5\%$.

Литература

1. *Догановский А.М.* Пространственные закономерности строения озерных котловин. // География и смежные науки, (ЛИХГерценовские чтения). — СПб., 2006, с. 26–32.
2. *Крюков В.Ф.* Методика территориального обобщения статистических характеристик минимального стока рек (на примере Дона). // Труды ГГИ, 1974, вып. 213, с. 107–126.

В.И. Биненко, Р.В. Иванов, В.З. Родионов

МОНИТОРИНГ РЕК, ОЗЕР, СУШИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

V.I. Binenko, R.V. Ivanov, V.Z. Rodionov

MONITORING OF RIVERS, LAKES, LAND-BASED USE OF UNMANNED AERIAL

В статье обсуждаются возможности мониторинга окружающей среды с использованием современных беспилотных летательных аппаратов, разработанных в ГУАП и центре беспилотных технологий на примере обнаружения и контроля пожаров, трубопроводов, линий электропередач, нефтеразливов, свалок, дистанционного зондирования атмосферы, мониторинга акваторий рек и озер, ледовой обстановки и других объектов как природной среды, так и техносферы.

Ключевые слова: мониторинг, окружающая среда, беспилотные летательные аппараты, видео и тепловые камеры, пожары, трубопроводы, разливы нефтепродуктов, дистанционное зондирование рек, озер, ледовой обстановки.

The article discusses possibilities of environmental monitoring with the use of advanced unmanned aircraft developed by the SUAI and the centre of unmanned technologies on the example of the detection and monitoring of fires, pipelines, power transmission lines, oil spills, waste dumps, remote sensing of the atmosphere, monitoring of rivers and lakes, ice conditions and other objects as the natural environment, and the technosphere.

Key words: environmental monitoring, unmanned aerial vehicles, visual and thermal imaging camera, oil and gas pipeline, fire remote sensing of rivers, lakes, ice conditions.

Введение

В XXI в. беспилотные летательные аппараты БЛА (от микро-авиационных комплексов до орбитальных типа X-37B) находят самое широкое применение в мире как военной, так и гражданской-научно-прикладных областях [1, 2, 3, 17, 18]. Внедрение современной цифровой техники на БЛА позволяет более эффективно использовать диапазон сверхвысоких частот, комплексно применять одновременно в одном и том же районе несколько БЛА.

Вопросы регионального мониторинга с БЛА атмосферы, гидросферы, в частности, рек и озер [6–9], нижележащей поверхности, объектов природной среды и техносферы являются востребованными, как в научных исследованиях, так и в практических приложениях по линии МЧС, МВД, МО и других ведомств [1–5, 10–20]. В нашей стране первые попытки аэрологических измерений с использованием БЛА были реализованы в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [1], а с 1993 г. в лаборатории технического моделирования — в дальнейшем Центр технологий беспилотной авиации

(ЦТБА) — проводились работы в направлении разработки БЛА с цифровой авионикой для решения задач экологического мониторинга [2, 3, 10, 14]. Основы устройств, проектирования, конструирования и производства БЛА-рассмотрены в работах [12, 13]. Количество типов БЛА, разработанных в России, превысило 210. Правовой статус БЛА определен циркуляром № 328 ИКАО, введена в действие с 15.11.2012 поправка № 43 к международным стандартам «Правила полетов», поэтому нормативно-правовые вопросы полетов БЛА наконец разрешены [3].

Основные типы БЛА были рассмотрены в работах [2, 3], в которой приведены летно-технические характеристики маломерных мини-БЛА с массой до 50 кг, временем полета несколько часов и высотой до 3–5 км, которые используются для задач экологического мониторинга окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

В настоящей работе будут рассмотрены возможности мини БЛА на электрической тяге и с двигателями внутреннего сгорания, а также типичные полезные нагрузки для мониторинга окружающей среды на основе использования БЛА.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА)

В табл. 1 приведены технические характеристики БЛА разработки Центра технологий беспилотной авиации ГУАП (г. Санкт-Петербург), использующих электродвигатели (Орлан 1 и 2), а также двигатели внутреннего сгорания (Орлан 3, 10, 30). Максимальная допустимая скорость ветра на старте для «Орлана 2, 3, 10, 30» — 10 м/с, для мультикоптера — 5 м/с, при диапазоне температур от –30 до 40°С.

БЛА серии «Орлан» мультикоптер — Орлан 1 и 2, в отличие от Орлан 3, 10, 30 выполнены с силовой установкой на базе бесколлекторных электрических двигателей и Литий-Полимерных аккумуляторов высокой энергетической плотности. Эти аппараты более просты в эксплуатации, но имеют меньшие дальности и продолжительности полета по сравнению с БЛА «Орлан» с двигателем внутреннего сгорания ДВС.

Оперативность проведения мониторинга обеспечивается наличием каналов связи реального времени между БЛА и надежным пунктом управления (НПУ), на котором проводится планирование полетов и обработки полученных результатов [3].

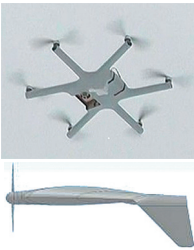
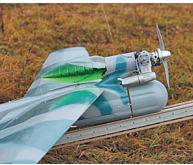
Высокоточные геодезические двухчастотные GPS приемники позволяют осуществлять высокоточную привязку центров съемки для обеспечения последующей обработки фотографий и сшивки карт кадастровой точности. При использовании базовой станции возможна реализация дифференциального режима определения координат. Большой объем памяти позволяет проводить продолжительный автономный полет с записью его параметров на борту для проведения последующей обработки и восстановления данных полета при съемке протяженных объектов и автономном полете БЛА.

Полезные нагрузки БЛА

БЛА, приведенные в табл. 1, с гиросtabilизацией предназначены для использования в качестве носителя для выполнения аэрофото-, видео- и ИК съемки как панорамной, так и плановой. Конструктивное исполнение с модульной архитектурой позволяет

оперативно менять полезные нагрузки и варьировать состав бортового оборудования. А герметичное исполнение модуля системы управления и полезной нагрузки существенно продлевает срок службы дорогостоящего оборудования при регулярной эксплуатации. Дополнительный объем внутри консолей крыла позволяет разместить на борту широкий спектр контрольно-измерительной аппаратуры.

Таблица 1

БЛА	Мультикоптер/ Орлан-2	Орлан-3	Орлан-10	Орлан-30
Фото				
Масса взлетная/ полезная нагрузка, кг	до 3/0,3 5/1	до 7/2	14/4	27/8,5
Скорость воздушная, км/ч	40/90	70–130	80–150	80–150
Макс. высота полета, м	2500/5000	до 5000	5000	5000
Радиус действия, км	5/50	100	200	300
Продолжительность полета с одной заправки, ч	1/2	6	10	15
Двигатель	Электро (LiPo)	OS-max-40 Смесь метанола, касторового масла и нитрометана	SA1TO FQ-36Бензин АИ-95	SA1TO FQ-57Бензин АИ-95
Бортовой генератора, Вт	-	50	150	400(1000)
Размах крыльев/ длина/высота фюзеляжа, м	1,598/0,715/0,236	2,1/1,45/0,4	2/2,4/0,6	2,08/2,4/0,6
Режим полета с навигацией GPS	Автоматический/ полуавтоматический	Автоматический/ полуавтоматический/ автономный	Автоматический/ полуавтоматический/ автономный	Автоматический/ полуавтоматический/ автономный
Способ старта/ посадки	С рук с земли/ авто С резинового жгута/ на парашюте	Пусковое устройство амортизационного типа/ по самолетному на площадку 50×50 м или на парашюте	Пусковое устройство амортизационного типа/ по самолетному на площадку 50×50 м или на парашюте	Пусковое устройство амортизационного типа/ по самолетному на площадку 50×50 м или на парашюте

Полезные нагрузки ПН:

Фотоаппараты — Casio Exilim EX-Z 1080, Canon Ixus 990, Canon EOS 500D-50D) с разрешением от 10 до 22 МП. Сшивка фотопланов упрощается с использованием данных телеметрии получаемых с геодезических GPS систем высокой точности привязки до 20–30 см. Для оперативной сшивки применяется программное ПО ТопоАксис позволяющее выполнять обработку с высокой скоростью прямо на месте управления БЛА. Спектрозональные фотокамеры (с использованием светофильтров) могут устанавливаться как отдельно, так и в совмещенном варианте с другими камерами или фотоаппаратами.

Курсовые камеры (BHV-558 EX): плановые камеры (BHV-558 EX, Toshiba HD 1080) с разрешением до 2 МП.

Поворотные камеры (BHV-558 EX, Toshiba HD 1080), гиросtabilизированные камеры (D-STAMP, U-STAMP). позволяющие получать на пункте обеспечения управления в онлайн режиме высококачественное изображение выбранного участка местности или объекта которые продолжительное время могут находиться в поле зрения камеры с 10 кратным оптическим зумом.

Тепловизионные камеры (Flir Photon 320, Flir Photon 640 с разрешением 640×480) позволяет проводить оперативный мониторинг протяженных и площадных объектов с возможностью сшивки тепловизионных планов с высоким разрешением.

Лазерный высотомер малых и средних высот позволяет измерять высоту над нижележащей поверхностью с точностью до 30–50 см в диапазоне висот от 50 до 1000 м. В условиях полета на малых высотах применяется как основной датчик высоты для системы автоматического управления БЛА (применяется на БЛА Орлан 10 и 30).

Гамма-радиометр используется для радиационных измерений, и может устанавливаться на Орлан 2, 3, 10 и при поддержке программного модуля на наземном пункте наблюдения НПУ. для создания диаграмм уровня радиационного загрязнения исследуемого пространства.

В качестве ПН возможно также установка детекторов влажности, температуры, давления, фляг для забора атмосферного воздуха с последующим в лабораторных условиях определением концентраций газовых компонент.

Для сравнения компания ZALA AERO GROUP, которая использует в основном БЛА на электрической тяге для мониторинга ОС используют управляемый тепловизор Z-16ИК35/ВкЛ (спектральный диапазон 7,5–13,5 мкм) на электромагнитной гиросtabilизированной платформе, передающий изображения с разрешением 640×512 (35 мм), совмещенный с видеокамерой, передающей изображения с разрешением 720×576 ; целевая нагрузка обладает встроенными цифровыми фильтрами, 4-х кратным цифровым увеличением, лазерным целеуказателем, углом обзора по крену от $+175^\circ$ до -175° , по тангажу от $+75^\circ$ до -45° , встроенной гироскурсовертикалью, 3 датчиками угловой скорости и 3 датчиками линейного ускорения. При необходимости проведения радиационной разведки, на БЛА, входящие в состав универсального комплекса ZALA, устанавливается дополнительное устройство — Z-16GAMMA, позволяющее определить уровень радиационного излучения на обследуемой местности. При этом, полученные данные передаются с борта БЛА на НСУ в режиме реального времени [18].

Примеры мониторинга окружающей среды

Мониторинг параметров пограничного слоя атмосферы, гидрологического режима рек и озер проводится на основе сетевых как метеорологических, так и гидрологических наблюдений. Наряду с этим они могут быть дополнены на основе использования БЛА. Так, для примера, на рис. 1 приведены результаты зондирования вертикального профиля влажности в облачный (кривая 1) и ясный (кривая 2) дни, который демонстрирует возможность определения нижней границы облака на уровне 1800 м.

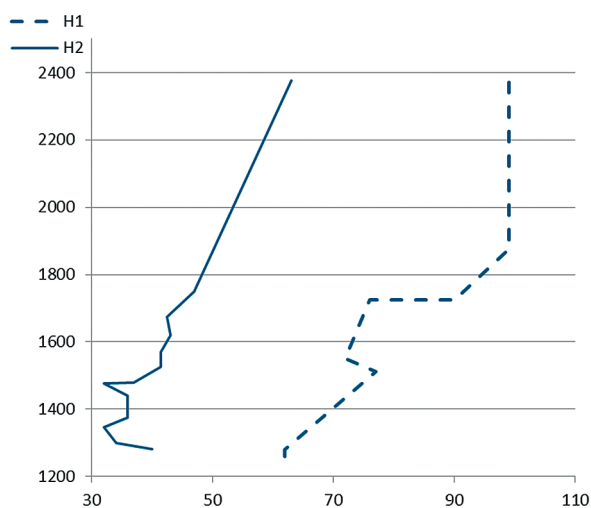


Рис. 1. Вертикальные профили влажности при наличии облачности (1) при ясной погоде (2), полученные на основе использования БЛА

Суммарные осадки на территории ДФО за период с 01.06.2013 по 31.08.2013 в 2–3 раза превысили норму, что вызвало паводок на Амуре с экстремальным подъемом воды до 800 см и в некоторых районах даже выше, что привело затоплению огромных территорий, оперативный контроль которых можно контролировалось с помощью БЛА. На рис. 2 приведен снимок и карта района затопления шоссе, вблизи озера Длинного Мазановского района Амурской области [18].

Локальный мониторинг последствий такого рода стихийных бедствий, включая наводнения, землетрясения, пожары [4,20], засухи; техногенных аварий на потенциально опасных объектов топливно-энергетического комплекса ТЭК, нефтеразливы [2, 3, 5, 19], взрывы на военных складах, как например, 02.07.2011 в Удмурдии, или 05.02.2014 вблизи г. Киров — сход с рельс состава с газовым конденсатом, который сопровождался пожаром и контролировался с БЛА [18]. Поэтому использование БЛА для оперативного контроля и определения координат наиболее опасных мест развития чрезвычайных ситуаций является одним из важных составляющих комплексного мониторинга окружающей среды с высот от 200 до 1500 м.



Рис. 2. Паводок на Амуре 12.08.2013 в Амурской обл., затронул Мазановский р-н, Новокиевский Увал по данным БЛА «zala.aero»

Одновременная тепловизионная и аэросъемка применяется как при мониторинге, так и картографировании природных и техногенных объектов — разрывы и врезки на трубопроводных магистралях, ЛЭП, скрытых и активных пожаров, определение наличия живых существ в том числе и ночью, свалок, нефтеразливов в портах. Примеры такого рода аэросъемки в видимом и ИК-диапазоне (7,5–13,5 мкм) приведены на рис. 3.

Результаты аэросъемки БЛА с использованием автоматических или автоматизированных программных продуктов таких как PHOTOMOD, Талка, AgiSoft, ТороAxis и другие позволяют осуществлять картографическую сшивку или 3D моделирование различных объектов (как, например, 3D модель отвалов горных пород совмещенные в тепловизионном и видимом диапазоне, представленных на рис. 3*а,к*). На рис. 4*а* представлен аэроснимок одного из строительных объектов в г. Сочи, а на рис. 4*б* — результат картографической съемки сделанной с высоты 450 м (сшивка из 40 кадров при разрешении 22 МП) строительных объектов в прибрежной полосе.

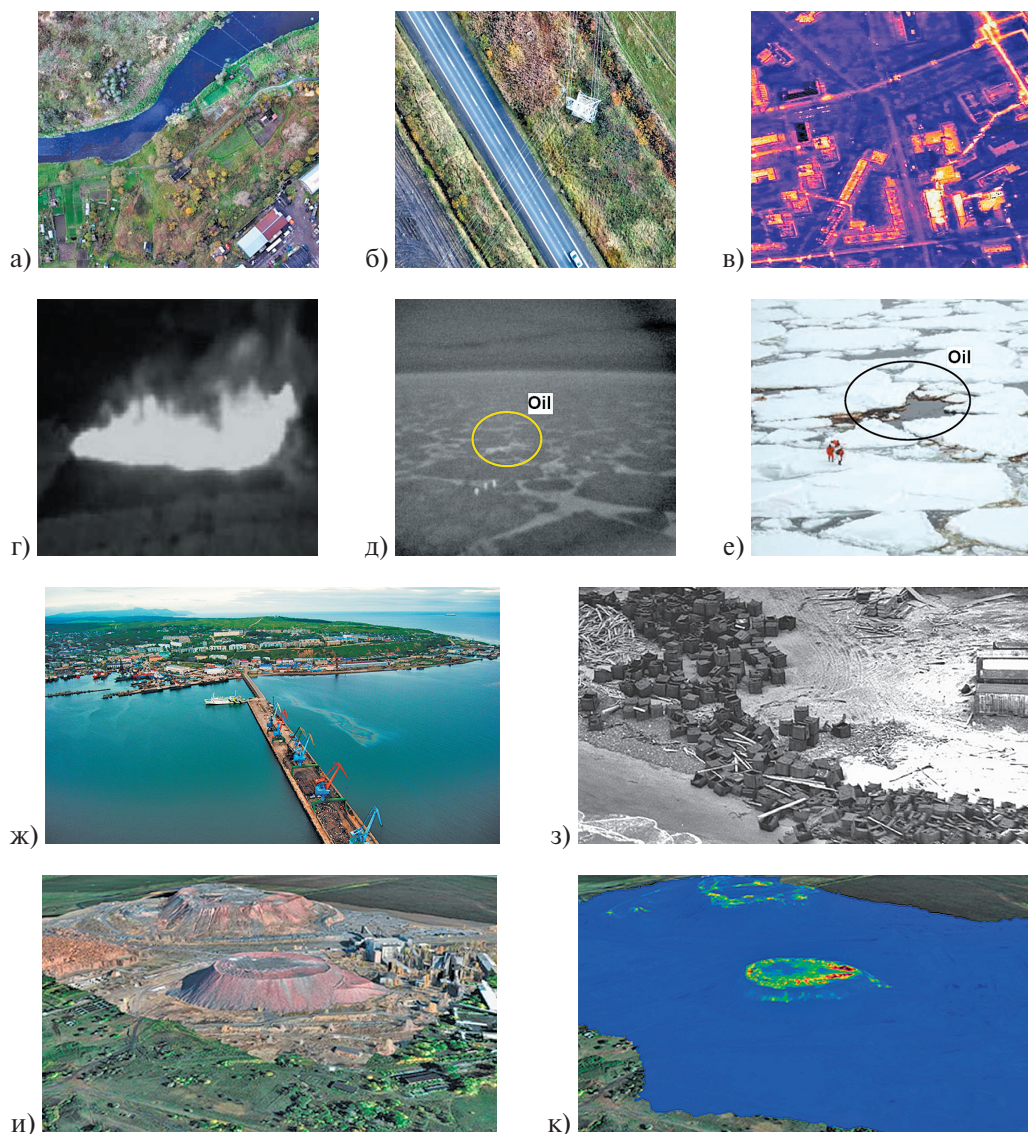


Рис.3. Примеры аэросъемки с БЛА окружающей среды в видимом и ИК-диапазоне спектра:
а — река и прибрежная зона; *б* — линия ЛЭП над дорогой, снятые в видимом диапазоне с разрешением 14 МР; *в* — городские подземные трубопроводы зарегистрированные в ИК области с помощью камеры AptinaMT9J003 модели GC3851C-BL smartekvision с разрешением 10,7 МР; *г* — ИК-изображение пожара с разрешением 2,1 МР; *д* — нефть между льдин, ИК-изображенным (слева); *е* — в видимом диапазоне (справа) (согласно, Dickins, 2010 [15]); *ж* — нефтеразлив в порту; *з* — свалка на берегу реки; *и* — отвалы в видимом; *к* — те же отвалы в ИК-диапазоне, в котором лучше регистрируются тепловые аномалии



Рис. 4. Контроль строительства олимпийских объектов в Сочи — картографическая съемка (сшивка из 40 кадров при разрешении 22 МП) строительных объектов в прибрежной полосе сделанная с высота 450 м

Заключение

Методы дистанционного и оперативного контроля с привлечением видимой и тепловой съемки на основе использования БЛА позволяют осуществлять локальный мониторинг и определение координат потенциально-опасных объектов в случае природных и техногенных чрезвычайных ситуаций: наводнения, пожары, взрывы, нефтеразливы, радиационные аварии (гамма съемка) и др. по линии служб МЧС, в области природо-охранных мероприятий — зондирование атмосферы, мониторинг рек и озер, контроль лесных массивов, сельскохозяйственных полей, несанкционированных свалок, учет диких животных, в частности, оленей, тюленей, бельков на снеге и льду, аэросъемка строек в городских агломерациях, состояние ЛЭП, ТЭК, портов, продуктопроводов, хранилищ, а также авиаконтроль движения транспортных потоков, плавсредств, ледовой обстановки, поиск людей и иных объектов биосферы и техносферы. Использование БЛА является наиболее экономически выгодным, безопасным и оперативным средством мониторинга окружающей среды, позволяют принимать управленческие решения по сохранению устойчивого развития и экологической безопасности регионов.

Литература

1. *Алдошин Л.Т., Попов М.В.* Радиоуправляемый измерительный комплекс для аэрологических исследований пограничного слоя атмосферы // Труды ГГО, 1974, вып. 309, с. 78–90.
2. *Андреев В.Л., Биненко В.И., Иванов Р.В.* Экологический мониторинг природно-хозяйственных систем на основе беспилотных летательных аппаратов. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 18, с. 139–150.

3. *Биненко В.И., Донченко В.К., Андреев В.Л., Иванов Р.В.* Некоторые результаты и перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для задач экологического мониторинга. // Экологическая химия, 2001, № 1, с. 21–31.
4. *Биненко В.И., Дьяченко Л.Н., Кондратьев К.Я., Черненко А.П.* Обнаружение очагов горения малых размеров методом ИК-съемки. // Труды ГГО, 1972, вып. 275, с. 226–236.
5. *Биненко В.И., Черноок В.И., Иванов Р.В.* Экологическая безопасность добычи и транспортирования углеводородов на острове Сахалин на основе исследования аэрометодов и ГИС-технологий. // Региональная экология, 2010, № 3(29), с. 19–23.
6. *Догановский А.М.* Гидрология суши. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 524 с.
7. *Догановский А.М.* Уровненный режим Ладожского озера—показатель изменения климата. // Материалы итоговой сессии Ученого совета РГГМУ. Часть 1. Секция метеорология и гидрология. — СПб., 2003, с. 76–78.
8. *Догановский А.М., Малинин В.А.* Гидросфера Земли. — СПб.: Гидрометеиздат, 2004. — 630 с.
9. Ладога. Под ред. В.А. Румянцева и С.А. Кондратьева. — СПб.: Нестор-История, 2013. — 468 с.
10. Пат. №97112 РФ, МКП7:В64С29/00. Авиационно-технический комплекс /В.Л. Андреев, Р.В. Иванов, Е.Б. Козлов, Д.В. Морщакин, С.Г. Потупчик (Россия) №2010 115460/11 // Открытия. Изобретения, 2010. — 3 с.
11. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно-пилотируемые летательные аппараты). Под ред И.С. Голубева и Ю.И. Янкевича. — М.: изд. МАИ, 2006. — 528 с.
12. *Шаров С.Н.* Локационные управляющие системы БЛА. — СПб.: Балт. гос. техн. университет, 2009. — 312 с.
13. *Шибяев В., Буня В., Кобцева Т.* Нормативно-правовое регулирование создания и применения беспилотных авиационных систем в России. // UAV.RU спецвыпуск INTERPOLTEX-UVS TECH, 2012, с. 29–31.
14. *Binenko V.I., Andreev V.L., Ivanov R.V.* Remote sensing of environment on the base of the microavition. // 31-st International Symposium on Remote Sensing of Environment Global Monitoring for Sustainability and Security June 20–24, 2005. — 4 p.
15. *Dickins D.F., Andersen J.H.* Evaluation of Airborne Remote Sensing Systems for Oil in Ice Detection. // SINTEF Oil-in-Ice final report, Trondheim, 2010, № 28.
16. *Fingas M., Brown C.E.* Oil Spill Remote Sensing: A Review. // In Fingas M.F. (Ed.), Oil Spill Science and Technology: Prevention, Response, and Clean-up. — New York, Elsevier, 2011.
17. [http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle].
18. [<http://zala.aero/?yclid=5707092084552260455>].
19. *Puestov T. and et al.* Oil spill detection and mapping in low visibility and ice surface remote sensing. // Final Report 5.1 Arctic response technology oil spill preparedness 15 oct. 2013. — 84 p.
20. *San-Miguel-Ayanz J., Ravail N., Kelha V., Ollero A.* Active Fire Detection for Fire Emergency Management: Potential and Limitations for the Operational Use of Remote Sensing. // Natural Hazards, 2005, vol. 35, № 3, pp. 361–376.

Е.Ю. Киселев, В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин

**ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ БОРЬБЫ С «ЦВЕТЕНИЕМ» ВОДЫ В ВОДОЕМАХ.
МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДОРΟΣЛИ**

E.Yu. Kiselev, V.A. Rumyantsev, V.N. Rybakin

**APPLICATION OF LOW INTENSITY ULTRASOUND FOR PREVENTING
ALGAL BLOOMS IN WATER BODIES. MECHANISMS OF ACTION ON ALGAE**

Дан обзор воздействия ультразвукового излучения низкой интенсивности на водоросли. Описаны некоторые этапы развития методики и устройств для борьбы с «цветением» воды в водоемах с помощью ультразвука низкой интенсивности. Рассмотрены механизмы такого воздействия.

Ключевые слова: ультразвук низкой интенсивности, водоросли, цианобактерии, «цветение» воды, механизмы воздействия.

An overview of the effect of low intensity ultrasound on algae is provided. Some milestones in the development of the technology and devices for fighting algae growth in water bodies with the help of low intensity ultrasound are described. The mechanisms of this treatment are considered.

Key words: low intensity ultrasound, algae, cyanobacteria, algal bloom, mechanisms of action.

Посвящается А.М. Догановскому,
моему учителю и большому другу...
В.А. Румянцев

Введение

Проблема борьбы с «цветением» воды в водоемах обсуждается в научной литературе уже несколько десятилетий. Это явление, часто связанное с массовым развитием сине-зеленых водорослей, или цианобактерий, представляет серьезную экологическую опасность [2]. Озерные системы реагируют на климатические изменения, что влияет на биоценозы, и, в частности, на фитопланктон [1]. Наблюдающиеся в последнее время изменения климата делают проблему борьбы с «цветением» воды еще более актуальной. В качестве основных методов ее решения предлагаются химические, биологические, биохимические и физические подходы.

О возможности воздействия ультразвука на водоросли известно достаточно давно. Так, Вуд и Лумис в 1927 г. наблюдали разрушение водорослей *Spirogyra* и *Paramecium* под воздействием ультразвука неизвестной интенсивности [30]. В последнее время воздействие ультразвуком стало рассматриваться как достаточно перспективный метод борьбы с «цветением» воды в водоемах. Известно некоторое количество публикаций,

в которых описываются лабораторные и натурные эксперименты по воздействию ультразвука высокой интенсивности на водоросли, при этом, воздействие объясняется главным образом эффектом кавитации [33].

Однако в конце XX в. было отмечено, что борьба с водорослями в водоемах возможна и при помощи ультразвука низкой интенсивности. Уже в течение более 10 лет несколькими частными компаниями в разных странах мира производятся и продаются устройства для борьбы с водорослями в водоемах, использующие ультразвук низкой интенсивности [9]. Известны следующие производители таких устройств: Thomas-Electronics (Бельгия, устройство Aquanet и др.) [11], LG Sound (Нидерланды, устройства MPC Buoy, XXL) [7], Sonic Solutions (США, устройства серии SS) [9], Envirosonic (устройства серии ES, PVSystem) [5], Toscano Linea Electronica SL (Испания, устройство DUMO Algacleaner) [10], Algenfrei (устройства G-Sonic) [4], Flexidal Technics (устройства серии AL) [8], VoR Environmental (устройство VoR algae controller XXL) [12], Lenntech [6]. В последнее время такие устройства появляются на российском рынке, выпущена отечественная установка — Инлаб И100-34 «Альт» [3]. Судя по внешнему виду, некоторые устройства могут быть копиями или перемаркированными изделиями других производителей.

Обычно, устройства излучают колебания на частотах в диапазоне от 16 до 150 кГц [14]. Потребляемая мощность составляет от единиц до десятков ватт, дальность действия — от десятков до сотен метров. В данном случае, воздействие на водоросли и другие объекты вряд ли может объясняться явлением кавитации [33]. Для появления заметных результатов требуется достаточно много времени — до нескольких недель, устройства должны работать в течение всего вегетационного сезона водорослей для достижения наилучшего результата.

Ультразвуковые устройства для борьбы с водорослями широко рекламируются и находят своих покупателей, так устройств Thomas-Electronics продано более 15000 [11], LG Sonic — более 10000 [7]. Однако, научные испытания устройств, излучающих ультразвук малой мощности, например, таких как Sonic Solutions и LG Sonic, не распространены [33]. Значительное количество информации размещено на сайтах производителей устройств и в различных изданиях, преимущественно без ссылок на какие-либо работы, без описания условий экспериментов и методов анализа. Тем не менее, в большей или меньшей степени, такие сведения вошли в обзор.

Стоит отметить, что согласно опубликованным данным, ультразвук низкой интенсивности может оказывать селективное воздействие на определенные виды водорослей. Поэтому такая методика позволяет подавлять развитие видов водорослей, представляющих опасность. При этом влияния на остальные виды водорослей и другие организмы не оказывается, что минимизирует изменения в пищевой цепи и экосистеме [28, 19].

Некоторые этапы развития методики и устройств

Об истории развития методики борьбы с «цветением» воды с помощью ультразвука малой интенсивности известно немного. Согласно [15], устройства, упомянутые выше, могут быть вариациями лицензии на право производства, основанной на оригинальной методике, разработанной в Нидерландах около 20 лет назад.

В 1999 г. фирма Thomas Electronics выпускает свое первое устройство для борьбы с водорослями с помощью ультразвука низкой интенсивности. В 2001 г. компания Thomas Electronics патентует методику и излучатель для обработки воды в водоеме [28]. Согласно патенту, изобретение в первую очередь предполагает предупреждение роста водорослей, и не исключает подавление других организмов, таких как грибы и др. Подавление водорослей и других организмов осуществляется за счет распространения колебаний в воде. Особенно важным аспектом изобретения является то, что используются те колебания, которые разрушают организмы или их части за счет «резонансных» эффектов, создаваемых в них. Согласно патенту, предпочтительно использовать ультразвуковые колебания, в диапазоне от 20 до 35 кГц.

Фирма LG Sound наряду с научными и другими организациями участвовала в двухлетних проектах CHEME-FREE и ClearWaterPMPC, стартовавших 1 июля 2006 г. и 1 января 2012 г. соответственно. Целью первого проекта являлась разработка нехимической системы очистки воды путем интеграции облучения УФ-С, ультразвука и волоконных фильтров. Целью второго проекта являлась разработка эффективной экологически безопасной системы регулирования развития водорослей, основанной на ультразвуковой технологии, для применения на больших прудах и озерах. Проекты финансировались Европейской Комиссией, и их общие бюджеты составляли 1893080 Евро и 1383788 Евро соответственно [18, 19].

В 2013 г. компания LG Sound патентует систему и метод для предсказания, мониторинга, предупреждения и борьбы с водорослями на открытой воде [15]. Изобретение основывается на известных ранее методиках и устройствах и имеет целью повысить их эффективность, увеличить дальность действия и уменьшить необходимость обслуживания устройств, открывая возможность применения на больших озерах и открытой воде. Изобретение в дальнейшем имеет цель предоставить метод, который может быть использован для уничтожения определенного вида водорослей, не влияя на другие водоросли. Показано, что для каждого вида водорослей требуется определенная частота, с определенным выходом энергии, амплитудой, формой импульса, длительностью импульса и паузы, что позволяет точно нацеливаться на уничтожение определенных видов водорослей.

Запатентованные решения реализованы в выпускаемом LG Sound устройстве MPC Вюоу, позволяющем оценивать качество воды путем определения следующих параметров: хлорофилл-а, фикоанин, pH, общее твердое взвешенное вещество, растворенный кислород, температура. Полученные данные передаются в реальном времени по радиоканалу, 3G или GPRS телеметрии для дальнейшей обработки в программном обеспечении, позволяющем предсказывать цветение и определять оптимальные параметры программы ультразвукового воздействия, основываясь на обнаруженных видах водорослей или цианобактерий [7].

Механизмы воздействия на водоросли

Как уже упоминалось, в данном обзоре речь идет об ультразвуке низкой интенсивности. Интенсивность, подразумеваемая как «низкая» может быть различной в различных областях применения ультразвука. Ультразвуковые устройства, о которых

упоминалось выше, обладают достаточно низкой потребляемой мощностью, а объемы водоемов достаточно велики. Поэтому их эффективность вряд ли может объясняться явлением кавитации. Кавитация может создаваться вблизи излучателя, где интенсивность может быть достаточной для этого. Пороговая интенсивность, при которой возникает кавитация, зависит от частоты ультразвуковых колебаний, присутствия зародышей кавитационных пузырьков, количества растворенного в воде газа и других факторов и в водопроводной воде при частоте 15 кГц равна $0,16\text{--}2\text{ Вт/см}^2$ [13]. Такие значения в данном обзоре будут рассматриваться как разделяющие ультразвук низкой и высокой интенсивности. Во многих источниках значения интенсивности, акустического давления или других характеристик, позволяющих судить об энергии ультразвуковых колебаний, неизвестны. В этих случаях работы были включены в обзор исходя из косвенных соображений — например, принимая во внимание мощность устройства и облучаемый объем.

При использовании ультразвука низкой интенсивности эффект его воздействия часто объясняется за счет резонансных явлений, возникающих в различных элементах клеток водорослей, также могут воздействовать силы продольных и поперечных акустических волн [31]. Резонансный механизм лежит в основе гипотез, объясняющих биологические изменения, происходящие под воздействием терапевтического ультразвука низкой интенсивности. Подробнее резонансный механизм и эти гипотезы будут описаны далее.

Согласно [11], водоросли, находящиеся вблизи источника ультразвука подавляются путем разрушения клеточной мембраны. На средних расстояниях от источника разрушаются вакуоли водорослей. Водоросли, находящиеся далеко от источника погибают от вызванного стресса. Таким образом, механизмы воздействия могут быть различными в зависимости от интенсивности ультразвука, связанной с удалением от источника. Тем не менее, во многих публикациях выделяются механизмы, специфичные для определенных типов водорослей.

1. Резонансное воздействие

Механизмы биологических эффектов ультразвука можно разделить на два вида: термические и механические [30]. Термический и механический кавитационный механизмы относительно хорошо изучены. Механизмы, обуславливающие биологические эффекты при воздействии ультразвука низких интенсивностей, которые не могут быть объяснены термическими или кавитационными явлениями, изучены мало.

Примером таких эффектов могут быть увеличение выработки интерлейкина-1, интерлейкина-8, сосудистого эндотелиального фактора роста, коллагена, стимуляция восстановления костей и ускорение тромболиза под воздействием терапевтического ультразвука частоты 45 кГц в диапазоне интенсивностей от 5 до 100 мВт/см² [23].

Для объяснения таких явлений выдвигаются гипотезы, в основах которых лежит явление резонанса. При этом, резонансные явления могут влиять как на внутриклеточные структуры, так и на молекулы и молекулярные комплексы.

Джонс в работе [23] делает предположение, что терапевтический ультразвук может модулировать пути передачи сигнала, которые приводят к регуляции генов или модуляции трансляции РНК в белковый продукт или обоим явлениям. Обобщая имеющиеся

данные, автор делает предположение, что механическая энергия ультразвуковой волны и поперечная сила ультразвуковой волны создают механические условия, которые возмущают клеточную мембрану и молекулярные структуры внутри клетки. Гипотеза частотного резонанса подразумевает, что механическая энергия ультразвуковой волны поглощается белками, нарушая структурную конформацию одиночного белка или мультимолекулярного комплекса [23]. Более того, ультразвуковая волна может вызывать резонансную активность в белке, модулируя эффекторную функцию молекулы или мультимолекулярного комплекса.

В другой работе [27] выдвигается гипотеза, предполагающая, что относительные колебательные смещения между внутриклеточными элементами различной плотности могут происходить в клетках под воздействием терапевтического ультразвука малой интенсивности. Такие смещения могут вызывать изменения в клеточной структуре и функционировании. Авторами проведено моделирование поведения сферического объекта, представляющего типичную органеллу, такую как ядро, внутри однородной вязкоупругой среды, которая колеблется равномерно. Резонансная частота, при которой достигаются внутриклеточные колебания максимальной амплитуды, оценена в десятки — сотни кГц. Предполагается, что кумулятивный эффект, похожий на эффект усталости, лежит в основе перехода от внутриклеточной деформации к биологическим изменениям.

Также некоторые биологические эффекты воздействия некавитационного ультразвука, которые могут быть объяснены явлением резонанса, описаны в работе [13].

2. Разрушение газовых везикул и седиментация

Во многих источниках подавление цианобактерий при воздействии ультразвука низкой интенсивности объясняется разрушением газовых везикул. Само по себе разрушение газовых везикул не приводит к гибели клеток, однако плавучесть цианобактерий уменьшается, что приводит к их седиментации. Такой принцип известен относительно давно и также лежит в основе других методов борьбы с цианобактериями. Например, газовые везикулы могут разрушаться при наложении гидростатического давления. Известны практические реализации, когда такая методика оказывается эффективной [21]. Газовые везикулы могут восстанавливаться после разрушения. Скорость их восстановления зависит от освещения и количества доступных питательных веществ [21, 25]. Могут ли газовые везикулы восстанавливаться в присутствии ультразвука низкой интенсивности, пока не известно. Если у дна водоема не достаточно света, опустившиеся клетки не смогут восстановить газовые везикулы, и в случае, когда отсутствует турбулентное перемешивание, не смогут подняться в более высокие слои воды [21]. Что может происходить с водорослями, опустившимися на дно водоема, не вполне известно. Скорее всего, они могут быть разложены присутствующими в воде микроорганизмами [16]. Так же считают и другие авторы [29], но в этой работе газовые везикулы разрушались под воздействием ультразвука высокой интенсивности. В работе [22] отмечено, что в случае седиментации способность водорослей противостоять бактериям ухудшается.

Газовые везикулы могут разрушаться под воздействием ультразвука высокой интенсивности, что объясняется эффектом кавитации. Об этом упоминается в работах

[29, 25, 32]. В работах [25, 32] разрушение газовых везикул подтверждается просвечивающей электронной микроскопией.

Несмотря на то, что воздействие ультразвука низкой интенсивности на цианобактерии практически во всех источниках объясняется разрушением газовых везикул, пока надежного научного подтверждения этому в литературе не найдено. Так, например, в работе [24] в качестве основного воздействия ультразвука на цианобактерии приводится седиментация вследствие разрушения газовых везикул. При этом авторы ссылаются на работу [29], где воздействие на водоросли объясняется эффектом кавитации. В другой работе [20] авторы считают воздействие ультразвука на клетки водорослей не вполне объясненным.

Авторы [24] предполагают, что работа ультразвукового устройства LG Sonic Tank привела к седиментации водорослей. В облучаемом ультразвуком и в контрольном прудах количество видов фитопланктона составляло 7 и 26 соответственно, фитобентоса — 32 и 34 соответственно. Авторы заключают, что ультразвук эффективно удалял планктонные формы, но не был столь эффективным в удалении бентосных форм. Однако связывать результат такого эксперимента с воздействием ультразвука стоит с осторожностью, так как ультразвук применялся в комплексе с другими методами. Глубина пруда, использовавшегося в эксперименте, оказалась недостаточной — водоросли, находящиеся на дне могли фотосинтезировать. Это может создать дополнительные проблемы, когда водоросли начнут разлагаться.

3. Воздействие на другие клеточные структуры

Согласно данным, приведенным в работе [17], механизмом воздействия на водоросли *Spirogyra*, по-видимому, является разрушение связи между плазмалеммой и клеточными стенками водорослей. Это приводит к потере целостности мембраны, возможному вытеканию цитоплазмы и коллапсу клетки в плотную коричневую массу.

Согласно [16], под воздействием ультразвука, тонопласт зеленых водорослей может разрываться, при этом содержимое вакуоли попадает во внутреннюю клетку. Помимо этого, соединение клеточной мембраны и клеточной стенки может повреждаться. Также об отделении клеточной мембраны от клеточной стенки сообщается в работе [22].

Наблюдение под микроскопом нитчатых водорослей, подвергавшихся воздействию устройства LG Sonic SSS в течение двух недель, показало разрушенное содержимое клеток (хлоропласты) [26]. В емкостях масса водорослей вблизи ультразвукового устройства стала коричневой и потеряла связанность.

4. Другие механизмы

Производитель устройства Dumo Algacleaner помимо разрушения вакуолей, объясняет действие ультразвука за счет остановки деления клеток. В процессе деления клетки, когда все хромосомы присоединяются к микротрубочкам, дается сигнал перехода к анафазе, где хромосомы растягиваются в стороны этими трубочками. Любое возмущение будет дестабилизировать цепь микротрубочек. Таким образом, ультразвуковые импульсы нарушают полимеризацию микротрубочек, что в свою очередь, останавливает клеточный рост [10].

Авторы [33] в качестве возможного механизма подавления цианобактерий предлагают запрограммированную смерть клеток, ссылаясь на эффективность устройства Sonoxide.

В работе [34] показано, что ультразвуковое воздействие на частоте 1146 кГц и плотности мощности 0.0018 Вт/см³ привело к разрушению агрегатов водорослей *Microcystis Aeruginosa*. Это говорит о том, что воздействие ультразвука невысокой интенсивности может уменьшать размер колоний водорослей, что должно приводить к снижению скорости их поднятия в столбе воды, уменьшая преимущество в конкуренции с другими видами. Также водоросли с меньшим размером колоний могут быть более подвержены поеданию зоопланктоном.

Заключение

Ультразвук низкой интенсивности применяется для борьбы с водорослями в водоемах, однако у описываемых механизмов воздействия надежного научного подтверждения пока не найдено. В пользу резонансного механизма воздействия говорят гипотезы, выдвигаемые для объяснения терапевтических эффектов ультразвука низкой интенсивности. Возможность селективного воздействия на нежелательные виды водорослей является преимуществом данного метода. Однако, согласно [19], имеющиеся на данный момент устройства используют неселективные ультразвуковые программы, что снижает эффективность и создает риск воздействия на неопасные виды водорослей. Лишь LG Sound и Toscano Linea Electronica SL сообщают, что в их устройствах возможна подстройка ультразвуковой программы. Таким образом, совершенствование данной методики и разработка новых устройств представляются актуальными задачами.

Литература

1. Догановский А.М. Уровенный режим озер — интегральный показатель климатических и экологических изменений. // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana), 2007, № 1, с. 103—110.
2. Ниязгулов У.Д., Цховребов Э.С., Церенова М.П., Юрьев К.В., Яйли Е.О. Методы мониторинга водных экологических систем и биоресурсов. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 28, с. 128—132.
3. Производитель ультразвуковых устройств Инлаб. — Электронный ресурс: [http://www.utinlab.ru/].
4. Производитель ультразвуковых устройств Algenfrei. — Электронный ресурс: [http://www.algenfrei.com].
5. Производитель ультразвуковых устройств Envirosonic. — Электронный ресурс: [http://www.envirosonic.eu/index.htm].
6. Производитель ультразвуковых устройств Lenntech. — Электронный ресурс: [http://www.lenntech.de].
7. Производитель ультразвуковых устройств LG Sound. — Электронный ресурс: [http://www.lgsonic.com].
8. Производитель ультразвуковых устройств Flexidal Technics. — Электронный ресурс: [http://www.flexidal.be].
9. Производитель ультразвуковых устройств Sonic Solutions. — Электронный ресурс: [http://www.sonicsolutionsllc.com/].
10. Производитель ультразвуковых устройств Toscano Linea Electronica SL. — Электронный ресурс: [http://www.toscano.es/en/microsites-applications/micro-water-environment/dumo-algacleaner/].
11. Производитель ультразвуковых устройств Thomas Electronics. — Электронный ресурс: [http://www.thomas-electronics.be].
12. Производитель ультразвуковых устройств VoR Enviromental. — Электронный ресурс: [http://www.vor-env.com].
13. Эльпинер И.Е. Биофизика ультразвука. — М., 1973. — 384 с.

14. A system and method for predicting, monitoring, preventing and controlling algae in open water. Patent WO2013055207 (A1). — Электронный ресурс: [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=worldwide.espacenet.com&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20130418&CC=WO&NR=2013055207A1&KC=A1].
15. Alternative and innovative methods for source water management of algae and cyanobacteria. Water research foundation, 2012. — Электронный ресурс: [http://www.waterrf.org/ExecutiveSummaryLibrary/4094_ProjectSummary.pdf].
16. Brand L. Algae and biofilm chemical-free control and treatment solution. // *Pollutionsolutions-online*, May/June 2011, pp. 4–5.
17. Centre for aquatic plant management research results 2003. — Электронный ресурс: [<http://www.envirosonic.eu/how-it-works.html>].
18. CHEM-FREE project. — Электронный ресурс: [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/107580_en.html].
19. ClearWaterPMPC project. — Электронный ресурс: [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/101607_en.html].
20. Griessler Bulc T., Istenic D., Šajin-Slak A. (2012). Ecosystem Technologies and Ecoremediation for Water Protection, Treatment and Reuse, Studies on Water Management Issues, Dr. Muthukrishnavellaisamy Kumarasamy (Ed.), ISBN: 978-953-307-961-5, InTech. — Электронный ресурс: [<http://www.intechopen.com/download/get/type/pdfs/id/26126>].
21. Huismans J., Matthijs H.C.P., Visser P.M. Harmful cyanobacteria. — Dordrecht, 2005. — 241 p.
22. Hutchinson G. Sound water practices. Ultrasonic technology controls algae and biofilm // *AWWA Opflow*, April 2008, pp. 18–19.
23. Johns L.D. Nonthermal effects of therapeutic ultrasound: the frequency resonance hypothesis. // *Journal of athletic training*, 2002, 37(3), pp. 293–299.
24. Krivograd Klemenčič A., Griessler Bulc T., Balabanič D. The effectiveness of chemical-free water treatment System combining fibre filters, ultrasound, And UV for fish farming on algal control. // *Periodicum Biologorum*, 2010, vol. 112, № 2, pp. 211–217.
25. Lee T.J., Nakano K., Matsumura M. A new method for the rapid evaluation of gas vacuoles regeneration and viability of cyanobacteria by flow cytometry. // *Biotechnology Letters*, 2000, 22(23), pp. 1833–1838.
26. Mason T.J. Sonochemistry and the environment — Providing a “green” link between chemistry, physics and engineering. // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14, pp. 476–483.
27. Meir O., Eitan K. Modeling linear vibration of cell nucleus in low intensity ultrasound field. // *Ultrasound Med. Biol.*, 2009 Jun, 35(6), 1015–25.
28. Method and transducer for treating the water in a basin. Patent EP1137601 (A1). — Электронный ресурс: [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=worldwide.espacenet.com&II=4&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20011004&CC=EP&NR=1137601A1&KC=A1].
29. Nakano K., Lee T.J., Matsumura M. In situ algal bloom control by the integration of ultrasonic radiation and jet circulation to flushing. // *Environ. Sci Technol* 35, 2001, pp. 4941–4946.
30. O'Brien W.D.Jr. Ultrasound — biophysics mechanisms. // *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 93, 2007, pp. 212–255.
31. Oyib D.H. Water treatment by means of ultrasound. // *Everything about water*, February 09, pp. 58–62.
32. Srisuksomwong P., Peerapornpisal Y., Nomura N., Whangchai N. Comparative ultrasonic irradiation efficiency of *Microcystis aeruginosa* and *M. wesenbergii* from surface bloom and re-flotation behavior. // *Chiang Mai J. Sci.*, 2012, 39(4), pp. 731–735.
33. Wu X., Joyce E.M., Mason T.J. The effects of ultrasound on cyanobacteria. // *Harmful Algae*, 2011, № 10, pp. 738–743.
34. Wu X., Joyce E.M., Mason T.J. Evaluation of the mechanisms of the effect of ultrasound on *Microcystis Aeruginosa* at different ultrasonic frequencies. // *Water Research*, June 2012, vol. 46, № 9, pp. 2851–2858.

Н.А. Нестеров, В.И. Кокорин

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОДЫ ИЗМЕРЕНИЕМ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

N.A. Nesterov, V.I. Kokorin

THE METHOD FOR DEFINITION OF WATER POLLUTION WITH MEASURE SPEED OF SOUND

Скорость распространения звука в воде зависит от ее гидрофизических и гидрохимических характеристик. Для определения загрязненности воды может быть предложен способ использующий эту прямую зависимость.

Ключевые слова: экологическая безопасность, скорость звука, температура воды, загрязнение воды.

Speed of sound in water depends on its hydrophysical and hydrochemical characteristics. For definition of water pollution can be offered the method of using this direct relationship.

Key words: environmental security, sound speed, water temperature, water pollution.

Пресная вода один из важнейших источников жизни на суше. Ее чистота — залог гармоничного существования флоры и фауны планеты. Качество воды в ряде регионов за последние десятилетия значительно ухудшилось и продолжает ухудшаться. В основном это связано с возросшей антропогенной нагрузкой на пресные водоемы. Промышленные и сельскохозяйственные предприятия, транспорт вносят огромный вклад в загрязнение рек и озер различными токсичными и нетоксичными веществами.

В последние годы значительно активизировались мероприятия по обеспечению экологической безопасности, охране и рациональному природопользованию водных ресурсов. Реализация этих мер предполагает проведение экологического мониторинга водоемов. И поэтому решению данной проблемы уделяется большое внимание.

Как отмечается в [1], основные показатели физико-химического состава озерных вод можно условно объединить в 5 групп.

Первая группа — наиболее консервативные компоненты, на которые практически не влияют внутриводоемные процессы, это ионный состав и общая минерализация воды. В качестве косвенного индикатора изменчивости общей минерализации используется электропроводность воды, поскольку между этими характеристиками существует прямая линейная зависимость.

Ко второй группе относятся так называемые «питательные вещества» — биогенные элементы. Они присутствуют в воде в виде неорганических и органических соединений. В эту группу входят фосфор, азот и кремний, при этом главенствующую роль играют соединения фосфора. Пространственно-временные особенности распределения и режим этих веществ определяются неоднородностью поступления их с водосбора,

гидрофизической структурой, интенсивностью биохимических и биологических процессов, происходящих в водоеме.

Третья группа компонентов тесно связана с жизнью озера, режим их определяется как гидрологическими факторами, так и биологической жизнью водоема. К ним относятся содержание в воде органического углерода, значение pH, кислородный режим водоема

К четвертой группе относятся соединения металлов (железо, марганец, алюминий, медь, кобальт и др.), концентрация которых в воде водоема определяется неоднородностью поступления их с водосбора, что связано с ландшафтными условиями территории и антропогенными факторами, а также происходящими в озере внутри водоемными процессами.

Пятая группа включает загрязняющие вещества, не свойственные природе водоемов. Они поступают с водосборного бассейна со сточными водами промышленных и сельскохозяйственных предприятий, от водного и наземного транспорта, а также являются вторичным продуктом распада в результате биохимических процессов. Сюда можно отнести нефтеуглеводороды, фенолы, лигносульфонаты, соли тяжелых металлов, хлорорганические соединения и др.

В настоящее время разработаны и применяются целый ряд контактных и бесконтактных способов определения физико-химического состава водоемов и измерения загрязненности воды (нейтронно-активационный, рентгеноспектральный, атомно-абсорбционный и атомно-эмиссионный анализ, спектрофотометрический и флуориметрический методы, инфракрасная спектрометрия и т.п.) [2]. Учитывая, что скорость распространения звука в воде зависит от ее гидрофизических и гидрохимических характеристик, способ определения загрязненности воды измерением скорости звука в ней может быть предложен в качестве одного из них.

Очевидным преимуществом данного подхода является возможность оперативного определения скорости звука прямым способом (по измерению промежутка времени прохождения акустического луча определенного расстояния) *in situ* и тем самым оперативно устанавливать факт загрязнения данного участка водоема. По мере накопления статистического материала по данным измерениям может использоваться и относительный способ определения загрязненности (по измерению поправок за счет разности скорости звука, электропроводности и плотности воды с применением соответствующих эмпирических зависимостей).

Как известно, скорость звука в воде (c) зависит от температуры, ее состава (наличия в ней различных химических элементов и примесей) и плотности. И может быть измерена как непосредственно, так и рассчитана по эмпирическим формулам, представляющим собой зависимости вида [2]:

$$c = c_0 + \Delta C_T + \Delta C_S + \Delta C_P + \Delta C_{TSP}, \quad (1)$$

где c_0 — опорное значение скорости звука при $T = 0^\circ\text{C}$, $S = 35\text{‰}$, $P = 9,806\text{ Па}$; ΔC_T , ΔC_S , ΔC_P , ΔC_{TSP} — поправки за температуру, соленость, давление и совместное влияние температуры, солености и давления.

Наибольшее влияние на изменение скорости звука оказывает температура воды. В [2] отмечается, что при изменении температуры на 1°C при температуре воды 10°C

скорость звука изменяется на 3,6 м/с, при температуре 15°С изменяется на 3,2 м/с. В то же время изменение солёности на 1 ‰ (при $S = 30 \dots 35$ ‰) вызовет изменение скорости звука на $1,40 \pm 0,01$ м/с; изменение давления на 10 м глубины вызывает изменение скорости звука на $0,165 \dots 0,185$ м/с.

Вероятно, изменение состава и плотности воды вызванное ее загрязнением приведет к изменению скорости распространения звука в ней.

Измерив одновременно при одной и той же температуре скорость звука в какой-либо точке водоема и в образцовой пробе прямым способом и получив некоторую разность показаний, можно с определенной степенью вероятности предположить отличие в составе (минерализации) и плотности исследуемых проб воды.

Задача исключения влияния изменения температуры при проведении измерений, может быть решена одновременным измерением скорости распространения звука при одних и тех же условиях (при одинаковой температуре и давлении) в образцовой (незагрязненной) пробе и в определяемой на загрязнение воде. Практически, это означает измерение скорости звука, температуры и в одной точке устройством, имеющим два одинаковых датчика — измерителя скорости звука (с термометром), один из которых помещен в резервуар с образцовой (эталонной) пробой, другой непосредственно в воду (рис. 1). Измерение температуры необходимо поскольку ее влияние на скорость звука в воде при различных значениях варьируется. Как правило, современные измерители скорости звука оснащены датчиками температуры.

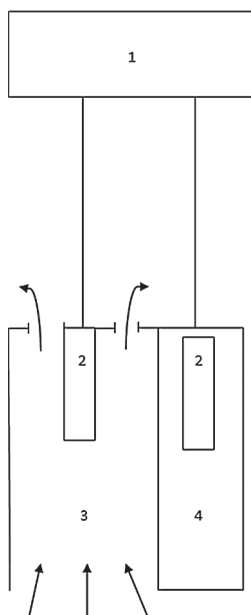


Рис. 1. Устройство для определения загрязнения водоема:

1 — вычислительное устройство обеспечивающее прием, обработку, регистрацию и отображение данных; 2 — датчики скорости звука; 3 — открытый резервуар; 4 — резервуар с эталонной (незагрязненной) водой

Другой важной задачей, требующей решения для реализации данного способа, является выбор или нахождение образцовой (эталонной) пробы воды для каждого конкретного водоема. Если для морской воды таким эталоном служит «нормальная вода», то для конкретных пресных водоемов возникает необходимость поиска незагрязненной воды непосредственно в самих водоемах или приготовления таких проб по известным описаниям состава воды этих водоемов. В общем, варианты выбора образцовой воды должны определяться для каждого конкретного случая и конкретных условий.

Например, в Ладожском озере в качестве эталонной, по-видимому, можно будет брать пробы воды в центральной или северной частях озера, практически не загрязненных в настоящее время.

В зависимости от цели исследований технология измерений указанным способом может варьироваться. Так для обследования загрязненности какого-либо участка водоема возможно проведение замеров в узлах равномерной или неравномерной сети измерений расположенной по исследуемому водоему (рис. 2).

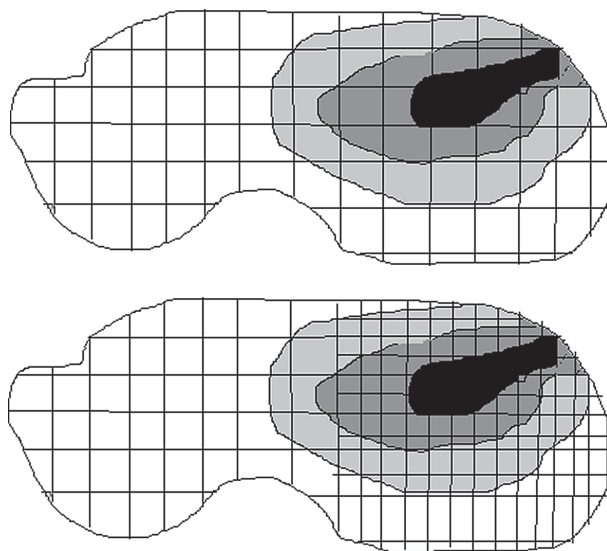


Рис. 2. Схемы равномерной и неравномерной сетей измерений

Если предположительно или точно известно место источника загрязнения, то целесообразно сгущение сети измерений у этого источника с последующим разрежением сети по мере удаления от него. Для определения степени загрязнения воды каким-либо промышленным или сельскохозяйственным предприятием возможна организация сравнительного контроля проведением замеров у водозабора и у водоотведения данного предприятия.

Рассматривая величину погрешности данного способа и полагая, в первом приближении, измеряемые скорости звука в исследуемой воде и эталонной пробе

статистически независимыми, можно допустить, что средняя квадратическая погрешность (скп) способа будет равна:

$$m = \sqrt{2}m_{\text{из}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{из}}$ — скп измерителя скорости звука.

Средняя квадратическая погрешность современных измерителей скорости звука, например, Valeport Mini SVS составляет не более 0,02 м/с. То есть скп способа не превысит 0,028 м/с.

Для сравнения такая величина изменения скорости звука при температуре воды 15° в практически пресной воде (соленость 0÷1 ‰) будет определяться изменением солёности примерно в 0,25 ‰ [3].

Таким образом, предлагаемые способ и устройство измерения скорости распространения звука позволяют с достаточными разрешениями и оперативностью устанавливать факт загрязнения воды в водоеме и оценивать величину этого загрязнения.

Литература

1. Атлас «Ладожское озеро». — Институт озераведения РАН, 2012.
2. *Догановский А.М.* Гидрология суши (общий курс). — СПб.: РГГМУ, 2012. — 524 с.
3. *Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин У.А. и др.* Справочник по гидроакустике. 2 изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1988. — 552 с.
4. *Зубов Н.Н.* Океанологические таблицы. Гидрометеиздат. — Л., 1957. — 407 с.

А.В. Гончаров, К.М. Абдуллаева

**ОСОБЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА МОСКВОРЕЦКИХ
ВОДОХРАНИЛИЩ В СВЯЗИ С ИХ ГЛУБОКОВОДНОСТЬЮ
И ИЗМЕНЕНИЕМ УРОВНЯ ВОДЫ**

A.V. Goncharov, K.M. Abdullayeva

**FEATURES OF PHYTOPLANKTON OF MOSKVORECKIE RESERVOIRS
IN CONNECTION WITH THEIR DEPTH AND WATER LEVEL CHANGE**

Анализ многолетних материалов показал, что различия в продуктивности Москворецких водохранилищ — Истринского, Можайского, Озернинского, Рузского — может быть следствием различий их глубоководности. Данная связь реализуется через воздействие биогенных элементов, вынос которых из придонных слоев к поверхности водоема легче происходит при низком уровне воды, чем при высоком.

Ключевые слова: уровень воды, глубоководность, биологическая продуктивность, фитопланктон, биогенные элементы, москворецкие водохранилища.

Analysis of long-term materials showed that differences in productivity of Moskvoreckie reservoirs — Istra, Mozhaisky, Ozerinsky, Ruzsky — may be due to differences in their deep-water nature. This connection is realized through the influence of biogenic elements, removal from near-bottom layers to the surface easier occurs at the lowest level of water than high.

Key words: level of water, deep water, biological productivity, phytoplankton, biogenic elements, Moskvoreckie reservoirs.

Уровень воды в водоемах и параметры глубоководности могут оказывать значительное влияние на их биопродукционные характеристики: «в одинаковых климатических условиях существенные различия в биотической части экосистем как раз и объясняются особенностями строения озерных систем» [3]. Изучение этого вопроса имеет важное значение для водохранилищ, в которых уровень и морфометрические параметры можно регулировать, а перед строительством — и проектировать.

Москворецкие водохранилища (Истринское, Можайское, Озернинское, Рузское) являются крупным источником водоснабжения г. Москвы. Это — высокопродуктивные водоемы, в которых массовое развитие фитопланктона может приводить к «цветению» воды, снижению концентрации растворенного в воде кислорода, появлению неприятного запаха — и к другим неблагоприятным последствиям. Рассматриваемые водоемы различаются между собой по степени и характеру развития фитопланктона; на рис. 1 приведены графики, построенные по данным «Мосводоканала». Наибольшей биомассой фитопланктона характеризуется Истринское водохранилище, затем идет Озернинское водохранилище, Рузское и Можайское (рис. 1а). В этом же порядке в планктоне снижается доля сине-зеленых водорослей и увеличивается процент диатомовых.

Обращает на себя внимание тесная связь между биомассой фитопланктона водохранилищ и коэффициентом их относительной глубоководности (рис. 1б); этот коэффициент предложен Д. Хатчинсоном [4] и представляет собой отношение средней глубины к средней ширине водоема, выраженное в промилле. Большая величина коэффициента относительной глубоководности свидетельствует об устойчивой термической стратификации водной массы водохранилища в летний период. При этом перемешиваемость водной массы и обогащение фотического слоя биогенными элементами из придонных слоев — затруднены. Дефицит биогенных элементов влечет за собой снижение первичной продукции и биомассы фитопланктона. Однако весной происходит активная конвективная циркуляция, водные массы насыщаются биогенными элементами и продукционные различия между водохранилищами стираются.

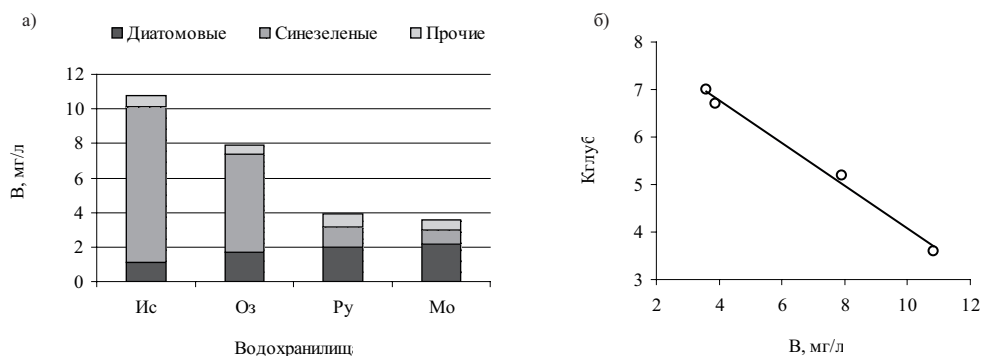


Рис. 1. Средние за вегетационный сезон значения биомассы фитопланктона (проведено осреднение по всем районам водохранилищ за апрель–октябрь 2002–2007 гг.), мг/л (а); связь между биомассой фитопланктона и коэффициентом глубоководности московских водохранилищ (б)

Характер сезонных изменений фитопланктона в московских водохранилищах сходен (рис. 2). После весеннего прогрева и перемешивания водной массы (выносящего биогенные элементы к поверхности) происходит бурное развитие диатомовых водорослей. В это же время наблюдается массовое размножение дафний, которые питаются водорослями и в ходе фильтрации осветляют воду. В июне наступает фаза «чистой воды», когда концентрация фитопланктона сильно снижается. Вслед за этим уменьшается и количество дафний, которые к тому же потребляются появившимися к этому времени мальками рыб и хищными беспозвоночными. В середине лета происходит новый подъем численности фитопланктона; однако преобладают в это время уже не диатомовые, а другие — сине-зеленые, а также динофитовые водоросли. Они устойчивы к выеданию беспозвоночными, т.к. имеют крупные размеры, либо образуют массивные колонии, недоступные для потребления фильтраторами. Кроме того, эти водоросли могут перемещаться по вертикали вниз и вверх и выбирать, таким образом, наиболее благоприятные условия с точки зрения освещенности и содержания биогенных элементов. Это очень важно, учитывая то, что в летнее время обычно наблюдается

дефицит биогенных элементов. В условиях недостатка в воде нитратов и аммония, сине-зеленые могут использовать атмосферный азот, осуществляя азотфиксацию.

На рис. 2 видны различия между Рузским и Истринским водохранилищами. В более продуктивном Истринском водохранилище основная часть биомассы фитопланктона создается летом сине-зелеными водорослями, для которых биогенных элементов, по-видимому, достаточно. Фосфор и азот в этом сравнительно мелководном водоеме могут поступать из придонных слоев к поверхности во время ветрового перемешивания летом. В Рузском водохранилище основная часть фитопланктона создается весной — после конвективного перемешивания водной массы. Летом фитопланктона здесь значительно меньше — по-видимому, сказывается недостаток биогенов, поступление которых из придонных слоев к поверхности затруднено вследствие большей глубокководности водохранилища.

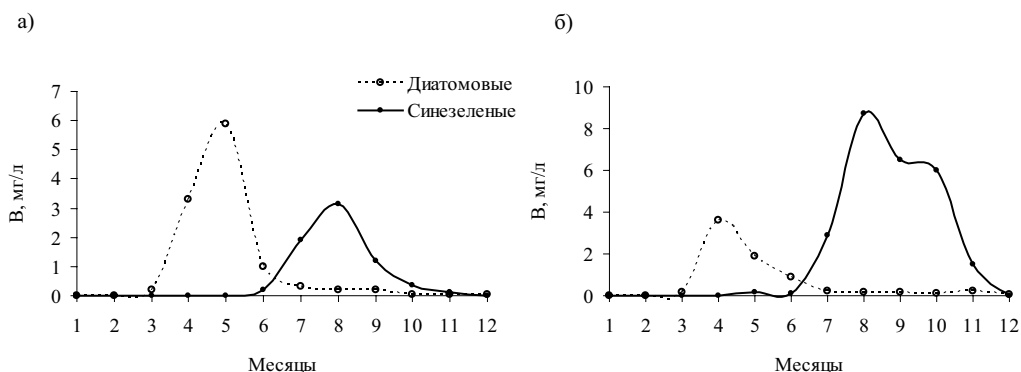


Рис. 2. Сезонные изменения фитопланктона в приплотинной зоне Рузского (а) и Истринского (б) водохранилищ (среднее за 2002–2007 гг.)

В московских водохранилищах довольно существенны межгодовые изменения биомассы фитопланктона. Для выяснения причин этого явления были подсчитаны коэффициенты корреляции между биомассой фитопланктона и некоторыми гидролого-гидрохимическими показателями (по данным ОАО «Мосводоканал»), которые могут рассматриваться в качестве влияющих факторов. В табл. 1–3 содержатся результаты расчетов, произведенных как по средним многолетним данным, так и по среднемесячным (за 1984–2012 гг.; а по Истринскому водохранилищу — за 1990–2012 гг.). Коэффициенты корреляции достоверны (при уровне значимости 0,05) начиная со значений $r = 0,35$ (а по Истринскому водохранилищу — с $r = 0,4$). В расчетах представлены приплотинные (нижние) районы водохранилищ, а для Можайского и Истринского водохранилищ кроме того — средние участки (у поселков Красновидово и Рождествено). Температура для расчетов использована из двух источников: $T_{\text{воды}}$ — температура воды в Можайском водохранилище (на водомерном посту в пос. Красновидово — измеряется 2 раза в день), $T_{\text{возд}}$ — температура воздуха по данным метеостанции «Можайск». Общий фосфор не измерялся, имеются только данные по фосфатам.

В табл. 1 подсчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между биомассой фитопланктона и гидролого-гидрохимическими параметрами водохранилищ — по средним за вегетационные периоды значениям (5–9 мес). Проявляется довольно существенная обратная связь биомассы фитопланктона с уровнем и объемом заполнения водохранилищ; особенно это характерно для приплотинных участков Озернинского ($r = -0,78$), Рузского $r = -0,73$, Можайского $r = -0,54$ водохранилищ. Связь с температурой очень слабая, за исключением Истринского водохранилища ($r = 0,54$).

Таблица 1

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между биомассой фитопланктона и гидролого-гидрохимическими параметрами водохранилищ — по средним за вегетационные периоды значениям (5–9 мес)

	Оз_Приплот	Ру_припл	Мож_Приплот	Мож_Средн	Ис_Приплот	Ис_Средн
Год	–0,09	0,19	–0,07	–0,04	0,44	0,23
Тводы	0,08	0,04	0,11	0,08	0,48	0
Твезд	0,1	0,07	0,1	0,05	0,54	0,42
Уровни ВБ	–0,54	–0,67	–0,12	–0,26	–0,27	–0,27
Объем заполнения	–0,78	–0,73	–0,54	–0,5	–0,12	–0,27
PO ₄	–0,06	–0,14	0,26	–0,26	0,11	–0,07
NO ₃ (N)	0,09	–0,15	–0,35	0,28	–0,06	–0,2
Мутн	0,63	–0,02	0,03	0,39	0,02	0,48

Обратную связь развития фитопланктона с уровнем водохранилища можно объяснить следующим образом. В жаркое сухое лето с низким уровнем, в водохранилище обычно выше температура придонного слоя воды. Вследствие этого, а также из-за малой глубины, складывается определенная цепь причинно-следственных связей. Более интенсивный удельный поток детрита в гипolimнион приводит к быстрому поглощению кислорода при разложении органического вещества. Возникновение резкого дефицита кислорода в придонных слоях стимулирует регенерацию биогенных веществ из донных отложений. В результате увеличивается внутренняя биогенная нагрузка. В этих условиях, на фоне малого притока биогенных веществ с водосбора, даже короткое штормовое перемешивание слоев приводит к быстрому обогащению прогретого эпилимниона биогенными веществами и наблюдается интенсивное развитие фитопланктона, иногда в виде резких вспышек цветения. В многоводные годы с высоким уровнем водохранилища эти процессы протекают гораздо менее интенсивно и развитие фитопланктона происходит более плавно, не достигая высоких величин [1].

В весеннее время связь биомассы фитопланктона с уровнем и объемом заполнения водохранилищ, как правило, снижается — табл. 2. Это можно объяснить тем, что весной водоросли, как правило, не испытывают дефицита биогенных элементов и дополнительное их поступление, связанное с пониженным уровнем, не требуется. Исключение составляет Можайское водохранилище, для которого коэффициенты корреляции с уровнем и объемом заполнения водохранилища составили $-0,57$ и $-0,73$.

По-видимому, здесь играют роль какие-то гидролого-морфометрические характеристики водоема, которые мы не учитываем.

В табл. 2 видно, что между биомассой диатомовых водорослей в мае и порядковым номером года имеется прямая связь; то есть биомасса водорослей возрастает со временем. Кроме того весной прослеживается положительная связь фитопланктона с температурой. Ранее, рассматривая аналогичное явление на примере Можайского водохранилища [2], мы высказывали мнение, что оно может быть вызвано потеплением климата.

Таблица 2

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между биомассой диатомовых водорослей и гидролого-гидрохимическими параметрами водохранилищ — по средним за май значениям

	Оз_Приплот	Ру_припл	Мож_Приплот	Мож_Средн	Ис_приплот	Ис_Средн
Год	0,53	0,54	0,66	0,56	0,68	0,29
Тводы	0,45	0,33	0,26	0,15	0,07	−0,14
Твезд	0,43	0,36	0,21	0,04	0,18	−0,18
Уровни ВБ (м)	−0,1	−0,2	−0,57	−0,3	0,31	−0,32
Объем заполнения	0	−0,18	−0,73	−0,16	0,48	−0,32
PO ₄	−0,22	−0,47	−0,31	−0,4	−0,04	−0,13
NO ₃ (N)	0,28	0,1	−0,07	−0,14	−0,19	0,9
Мутн	−0,09	−0,22	−0,2	−0,68	0,48	0,77

В табл. 3 оценивается связь сине-зеленых водорослей с различными гидролого-гидрохимическими параметрами летом. Видно, что в это время на первый план выходит роль уровня воды (объема заполнения водохранилища). Как упоминалось выше, летом водоросли обычно испытывают дефицит биогенных элементов и дополнительное их поступление из придонных слоев к поверхности при низком уровне, способствует возрастанию биомассы.

Таблица 3

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между биомассой сине-зеленых водорослей и гидролого-гидрохимическими параметрами водохранилищ — в июле

	Оз_Приплот	Ру_припл	Мож_Приплот	Мож_Средн	Ис_приплот	Ис_Средн
Год	−0,13	−0,01	0,09	0,16	0,13	0,07
Тводы	−0,1	−0,02	−0,08	0,21	0,24	−0,27
Твезд	−0,13	−0,12	−0,23	0,06	0,26	−0,23
Уровни ВБ (м)	−0,63	−0,57	−0,05	−0,31	−0,38	−0,58
Объем заполнения	−0,89	−0,47	−0,28	−0,44	−0,37	−0,58
PO ₄	0,32	0,49	0,3	−0,05	−0,06	0,17
NO ₃ (N)	0,26	−0,12	−0,38	0,03	0,42	0,6
Мутн	0,69	0,45	0,42	0,39	0,46	0,76

В то же время исчезают характерные для предыдущей таблицы связи фитопланктона с годами наблюдения и с температурой. То есть количество сине-зеленых водорослей не возрастает со временем, как это характерно для диатомовых весной. По-видимому, дефицит биогенных элементов летом не позволяет проявиться температурному фактору; кроме того, как известно, наибольший температурный тренд приходится на зимне-весенний период [2].

Выводы

Разница в продуктивности и биомассе фитопланктона Москворецких водохранилищ может быть следствием различий их глубоководности. Данная связь реализуется через воздействие биогенных элементов, вынос которых из придонных слоев к поверхности затруднен в водоемах с большим коэффициентом относительной глубоководности.

Влияние уровня воды на развитие фитопланктона проявляется на протяжении значительной части вегетационного сезона, когда фитопланктон лимитирован биогенными элементами.

В период весеннего перемешивания водной массы, когда биогенных элементов достаточно много, значение уровня воды, как фактора развития фитопланктона, снижается. В это время повышается роль температуры воды; наблюдается многолетний тренд увеличения биомассы диатомовых водорослей в мае, который, по всей вероятности, обусловлен потеплением климата.

Литература

1. Гончаров А.В., Даценко Ю.С. Зависимость степени развития фитопланктона от уровня воды в москворецких водохранилищах. // Актуальные проблемы водохранилищ. Всероссийская конференция с участием специалистов из стран ближнего и дальнего зарубежья. 29 октября — 3 ноября 2002 г., Борок, Россия: Тез. докл. — Ярославль, 2002, с. 63–64.
2. Гречушникова М.Г., Гончаров А.В., Калашикова Е.Г., Белов А.Ю. Многолетние изменения гидротермического режима и характера развития фитопланктона в Можайском водохранилище. // Вестник Московского университета, 2002, сер. V, География, №3, с. 22–25.
3. Догановский А.М. Уровенный режим озер — интегральный показатель климатических и экологических изменений. // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana), 2007, вып. 1, с. 103–110.
4. Хатчинсон Д. Лимнология. — М.: Прогресс, 1969. — 592 с.

М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев

**ОЦЕНКА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ПО ДАННЫМ О ГОДОВОМ
ТВЕРДОМ СТОКЕ ПРИТОКОВ (НА ПРИМЕРЕ СЕСТРОРЕЦКОГО
РАЗЛИВА)**

M.V. Shmakova, S.A. Kondratyev

**ASSESSMENT OF RESERVOIR SEDIMENTATION BASED ON DATA OF
ANNUAL SEDIMENT DISCHARGE IN TRIBUTARIES (SESTRORETSKIY
RASLIV AS A CASE STUDY)**

Одним из определяющих факторов скорости заиления водохранилищ является твердый сток его притоков. Предложен метод расчета расхода наносов в основных притоках. На основе метода с хорошей точностью оценено поступление наносов в водохранилище Сестрорецкий Разлив.

Ключевые слова: водохранилище, заиление, притоки, расход наносов.

One of the main factors of the sedimentation rate in reservoir is the sediment inflow with its tributaries. The method for calculating the sediment discharge in tributaries was developed. Based on this method the sediment inflow in the reservoir Sestroretsky Razliv was estimated precisely.

Key words: reservoir, sedimentation, tributary, sediment discharge.

Общие положения

При решении ряда водохозяйственных задач, связанных с заилением водохранилищ, возникает необходимость оценки годового твердого стока основных притоков. Рекомендации по расчету твердого стока [4] основаны на использовании данных о мутности расчетной реки или реки-аналога. Однако при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе приведенные методики оценки нормы твердого стока не подходят. Как правило, недостаточность и некорректность данных наблюдений за расходом наносов в реках не дают возможность получить достоверную информацию о параметрах его распределения.

Целью настоящего исследования является разработка и апробация метода оценки годового твердого стока рек как одного из основных факторов заиления водохранилищ речными наносами

Для оценки параметров распределения расходов наносов использован композиционный метод, который позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. Для применения указанного метода необходимо располагать формулой, адекватно описывающей взаимосвязь расхода наносов и гидравлических характеристик потока. Причем, гидравлические характеристики потока должны относиться к стандартной гидрометрической информации,

характер распределения которой хорошо изучен. Для этих целей может использована аналитическая формула расхода наносов [6, 7].

Формула для расчета расхода наносов

Основное уравнение математической модели движения воды и твердого вещества в речном потоке имеет вид [6]:

$$(1-f) \left(mg \left[I - \frac{\partial H}{\partial L} \right] - m \frac{dv}{dt} \right) - N_{act} m_{\text{ч}} \frac{dy_{\text{ч}}}{dt} + N_{act} m_{\text{ч}} g - cS = 0, \quad (1)$$

где m — масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; I — уклон дна; H — глубина потока, м; L — расстояние, м; v — скорость потока, м/с; t — время, с; $m_{\text{ч}}$ — масса частицы, кг; $v_{\text{ч}}$ — скорость движения частицы, м/с; f — коэффициент внутреннего трения, б/р; c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); S — площадь приложения силы, м²; N_{act} — количество перемещаемых частиц в потоке.

Уравнение движения воды и твердого вещества замыкается уравнениями неразрывности потока, равнодействующей скорости движения частиц и баланса кинетической энергии потока воды и твердого вещества. Для условий равномерного установившегося движения после некоторых преобразований этого уравнения получено, что расход наносов G , то есть масса твердого вещества, проходящая через поперечное сечение потока за единицу времени (кг/с), равен [6, 7]:

$$G = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{Hg} - (1-f) \rho_{\text{воды}} I \right], \quad (2)$$

где $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{грунта}}$ — плотности воды и грунта, кг/м³; Q — расход воды, м³/с.

Следует заметить, что расход наносов G включает и взвешенные и влекомые наносы. Параметры сопротивления f и c для речных потоков определяются в соответствии с категорией крупности донных отложений по табл. 1 [7]. В настоящее время значения параметров, приведенных в табл. 1, уточняются.

В зависимости от водности потока меняется и характер сопротивления потоку дна и берегов. Изменяется значение смоченного периметра в расчетном створе, так как имеет место зарастание русла в период межени, выход воды на пойму в половодье, и т.д. Таким образом, параметры f и c в формуле расхода наносов должны назначаться с учетом водности потока. Для этого можно выделить три основные фазы водности — половодье, межень и период средней водности, для которых и определяются параметры формулы.

Таблица 1

**Значения параметров f и c в зависимости от категории крупности донных отложений
для периода средней водности**

Вид донных отложений	Категория крупности донных отложений	Коэффициент внутреннего трения f , б/р	Сцепление частиц грунта при сдвиге c , кг/(м·с ²)
Суглинки	2	0,94	2,01
Песок	3	0,943	3,93
Песчано-галечные	4	0,95	5,23
Гравий	5	0,96	5,5
Галечно-гравелистые	6	0,98	5,5

Расчет среднемноголетнего расхода наносов

Как уже было отмечено выше, композиционный метод позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. Аргументами являются расход воды и средняя глубина потока, функцией — расход наносов. Кривые распределения суточных расходов воды обеспечены, как правило, достаточно продолжительными и надежными по качеству рядами наблюдений. Средняя глубина потока может быть получена по кривой $Q = f(H)$.

Для приведения суточных расходов воды к нормальному закону распределения удобно использовать одно из следующих выражений для нормализации суточных значений расходов воды:

$$\varphi_i = (Q_i + 1)^n \ln(Q_i + 1), \quad \varphi_i = e^{nQ_i} \ln(Q_i + 1), \quad \varphi_i = (Q_i + 1)^n, \quad (3)$$

где n — параметр нормализации.

Структура моделирования расхода наносов представлена на рис. 1. Исходными данными для расчета являются:

- Параметры распределения нормализованных значений суточных расходов воды (среднее, среднее квадратичное значения).
- Вид и параметры функции $Q = f(H)$.
- Величина среднего уклона русла.
- Крупность донных отложений.
- Параметры формулы расхода наносов для разных фаз водности — половодье, межень и период средней водности.

Основными этапами моделирования являются:

- Генерирование ряда нормально распределенных случайных чисел.
- Преобразование полученного ряда в ряд суточных расходов воды операциями, обратными нормированию и нормализации.
- Расчет значений средних глубин потока по соответствующим расходам воды $Q = f(H)$.

- Вычисление расходов наносов по расходам воды и средней глубины потока. В зависимости от расхода воды, при вычислении по формуле принимаются соответствующие значения параметров формулы расхода наносов.
- Построение кривой распределения расходов наносов и оценивание ее параметров.

Для оценки расхождения между наблюдаемыми и рассчитанными величинами годового твердого стока наблюдаемое значение годового стока взвешенных наносов следует привести к общему стоку наносов посредством известных соотношений между годовыми значениями взвешенных и влекомых наносов [2, 5].



Рис. 1. Структура моделирования расхода наносов (где $\bar{\varphi}$ и $\bar{G}$ — среднегодовые значения нормализованных расходов воды, м³/с и наносов, кг/с; G_{φ} — среднее квадратичное отклонение нормализованных суточных расходов воды; N — длина генерируемого ряда; i — индекс)

Расчет среднегодового расхода наносов

В качестве объекта применения предложенной методики выбрано водохранилище Сестрорецкий Разлив, основными притоками являются реки Сестра и Черная с

общей площадью водосбора 566 км². По данным наблюдений за расходами наносов твердый сток рек Черная и Сестра составил около 3,5 тыс. т/год. Причем, на р. Сестра приходится около 2,4 тыс. т/год, на р. Черная — 1,1 тыс. т/год. Это составляет около 85 % от общей массы поступивших в водохранилище веществ, при этом свыше 60 % наносов остается в водоеме в виде донных отложений, остальное выносится. По некоторым данным, средняя скорость осадконакопления сейчас составляет около 3 см/год [3]. При крайне небольших глубинах основной части Сестрорецкого Разлива (1–2 м) такая интенсивность осадконакопления приводит к быстрому сокращению объема и площади водоема [3].

На рис. 2 и 3 приведены зависимости $Q = f(H)$ для р. Сестра — ст. Белоостров и р. Черная — п. Дибуны и функции, их аппроксимирующие.

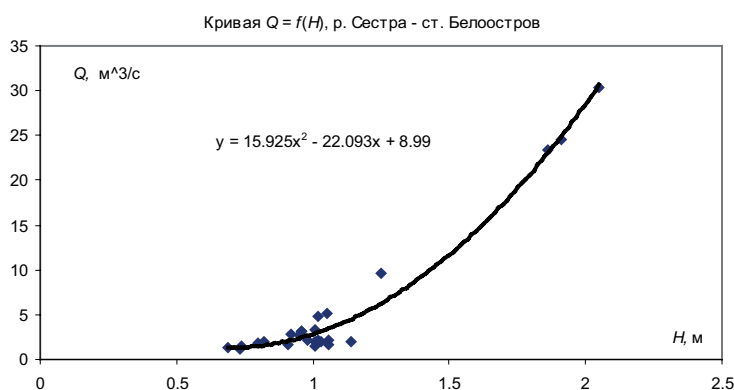


Рис. 2. Кривая $Q = f(H)$ для р. Сестра — ст. Белоостров

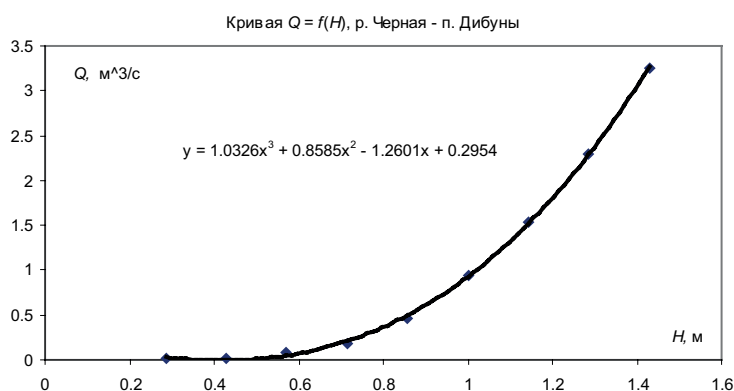


Рис. 3. Кривая $Q = f(H)$ для р. Черная — п. Дибуны

Для рек Сестра и Черная сгенерированы ряды суточных расходов воды длиной 36500 значений (100 лет) и для каждого расхода воды рассчитаны средняя глубина потока и расход наносов. Среднее относительное отклонение между среднемноголетними рассчитанными и измеренными значениями расходов наносов составило 6 % для р. Сестра и 16 % для р. Черная. Данные для расчета и результаты моделирования приведены в табл. 2. Основными возможными причинами отклонения являются погрешность аппроксимации эмпирических точек $Q=f(H)$, и ошибки измерения расхода наносов, с которым сравнивается рассчитанный расход наносов.

Таблица 2

Данные для расчетов и результаты моделирования годового твердого стока рек Сестра и Черная

	р. Сестра — ст. Белоостров	р. Черная — пос. Дибунь
$F, \text{ км}^2$	390	88
$I, \text{ б/р}$	0,00214	0,00248
$c_{\text{ср.вод}}, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$	1,4	1,6
$f_{\text{ср.вод}}, \text{ б/р}$	0,943	0,943
$c_{\text{мел.}}, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$	1,5	1,5
$f_{\text{мел.}}, \text{ б/р}$	0,95	0,95
$c_{\text{пол.}}, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$	1,5	1,5
$f_{\text{пол.}}, \text{ б/р}$	0,95	0,95
Q	4,28	0,916
σ_Q	6,5	1,39
$G_{\text{ср.рас}}, \text{ т/год}$	2254	926
$G_{\text{ср.набл.}}, \text{ т/год}$	2400	1100
$\left \frac{G_{\text{ср.рас}} - G_{\text{ср.набл.}}}{G_{\text{ср.набл.}}} \right \cdot 100\%$	6	16

Расчет периода заиления водохранилища речными наносами

Основными характеристиками заиления являются интенсивность и срок заиления. Суммарная приближенная оценка продолжительности заполнения водохранилища наносами может быть вычислена по формуле [1]:

$$T = \frac{W_{\text{в}}}{W_{\text{н}}(1-\delta)}, \quad (4)$$

где T — средняя продолжительность периода заиления водохранилища в годах; $W_{\text{в}}$ — мертвый объем водохранилища, м^3 ; $W_{\text{н}}$ — средний годовой объем наносов, м^3 ; δ — транзитная часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов, для равнинных водотоков в среднем $\delta = 0,3 - 0,4$.

Средний годовой объем наносов W_n , может быть определен по формуле:

$$W_n = \frac{31500 G_{\text{ср}}}{\beta}, \quad (5)$$

где $G_{\text{ср}}$ — средний годовой расход наносов, кг/сек; β — объемный вес наносов, т/м³, равный от 0,5...0,7 для илистых наносов в первые годы отложений до 1,0...1,5 для песчаных или илистых уплотненных наносов.

В табл. 3 приведены данные для расчета и результаты вычислений периодов заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива (T_n и T_p соответственно) для наблюдаемых $G_{\text{ср.набл}}$ и рассчитанных $G_{\text{ср.рас}}$ расходов наносов. Периоды заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива, полученные по наблюдаемым и рассчитанным данным за расходами наносов, отличаются не более чем на 10 %. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что речные наносы не являются основной причиной заиления Сестрорецкого Разлива. Одной из главных экологической проблемой Разлива является высокая скорость органического осадконакопления [3]. Причинами этого являются, прежде всего, сброс неочищенных сточных вод, наличие на водосборе сельскохозяйственных угодий, различных производственных комплексов, населенных пунктов, садоводческих участков, часть из которых расположена непосредственно в водоохранной зоне притоков. Замедленный водообмен Сестрорецкого Разлива, его мелководность и наличие застойных зон приводят к накоплению загрязняющих веществ в акватории водохранилища помимо поступления взвешенных частиц со стоком притоков.

Таблица 3

Данные для расчета и результаты вычисления скорости заиления речными наносами для Сестрорецкого Разлива

W_n , м ³	W_n , кг/год (для $G_{\text{ср.набл}}$)	$G_{\text{ср.набл}}$, кг/с	$G_{\text{ср.рас}}$, кг/с	$G_{\text{ср.прогноз}}$, кг/с	T_n , год	T_p , год
6 106	3,5 106	0,11	0,1	0,19	2664	2930

Выводы

Предложен метод оценки годового твердого стока рек как одного из основных факторов заиления водохранилищ речными наносами. Расчет параметров функции распределения расхода наносов в речном потоке основан на использовании композиционного метода теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов, предложенной ранее в [6]. Метод позволил с хорошей точностью оценить поступление наносов в водохранилище Сестрорецкий Разлив со стоком основных притоков — рек Сестра и Черная. Показано, что речные наносы не являются основным фактором заиления Сестрорецкого Разлива. По-видимому, в изучаемом водохранилище доминирует органическое осадконакопление.

Литература

1. *Догановский А.М., Орлов В.Г.* Сборник задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии). — СПб.: РГГМУ, 2011. — 315 с.
2. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. — М.: Географгиз, 1952. — 368 с.
3. *Природа Сестрорецкой низины.* — СПб.: СПбГУ, 2011. — 263 с.
4. *Указания по расчету стока наносов.* ВСН 01-73. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 30 с.
5. *Чалов Р.С., Алексеевский Н.И., Лю Шугуан.* Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. — М., 2000. — 216 с.
6. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб: Издательство Лема, 2013. — 142 с.
7. *Шмакова М.В.* Расчет заносимости русловых карьеров. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 46–57.

И.Ф. Горошкову — 100 лет



В 2013 году исполнилось 100 лет со дня рождения доцента кафедры гидрологии суши Ивана Филипповича Горошкова.

И.Ф. Горошков родился 6 июля 1913 года в деревне Новый Мокрец, Брагинского района Гомельской области, в большой крестьянской семье. В 1938 году он поступил в Московский Гидрометеорологический институт. В мае 1942 года его призывают в армию и отправляют на фронт. Старший сержант Горошков награжден медалями: «За боевые заслуги», «За отвагу», «За Победу над Германией».

В 1946 году (уже в Ленинграде) он окончил институт и поступил на работу в Государственный гидрологический институт. В 1949 году И.Ф. Горошков поступил в аспирантуру Ленинградского гидрометеорологического института. После защиты диссертации И.Ф. Горошков остался преподавать в ЛГМИ.

В августе 1955 года приказом Зам. Министра высшего образования СССР Иван Филиппович был откомандирован в Китайскую Народную Республику, для чтения лекций по курсу «Гидрологические расчеты и прогнозы» и помощи в организации учебного процесса «Гидротехнического института Восточного Китая» в г. Нанкине.

После двухлетнего пребывания в Китае Иван Филиппович продолжил педагогическую работу на кафедре Инженерной гидрологии, которая позже была переименована в кафедру Гидрологии суши.

В период службы в РГГМУ И.Ф. Горошков вел большую общественную работу, выполнял обязанности декана факультета, много времени уделял учебно-методической деятельности. И.Ф. Горошков опубликовал более 50 научных работ. Его учебник «Гидрологические расчеты», подготовленный в соавторстве с К.П. Клибашевым, был настольной книгой нескольких поколений инженеров-гидрологов.

В жизни Иван Филиппович Горошков был доброжелательным и отзывчивым человеком. Его многочисленные ученики и коллеги всегда с теплотой будут вспоминать встречи с ним.

Список авторов

- Абдуллаева Ксения Махировна*, ведущий программист ФГБУ «Центррегионводхоз» Дубненская экоаналитическая лаборатория (ДЭАЛ)
- Биненко Виктор Иванович*, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. физики РГГМУ
- Вершинин Дмитрий Александрович*, канд. геогр. наук, доц. каф. гидрологии Томского государственного университета
- Волчек Александр Александрович*, д-р геогр. наук, декан Брестского государственного технического университета
- Георгиев Андрей Павлович*, науч. сотр., канд. биол. наук, ФГБУН ИВПС КарНЦ РАН
- Голосов Сергей Дмитриевич*, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. лаборатории методов математического моделирования, Институт озераведения РАН
- Гончаров Александр Валентинович*, канд. биол. наук, в.н.с., каф. Гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
- Гузиватый Вадим Викторович*, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. Лаборатории гидрологии Института озераведения РАН
- Догановский Аркадий Михайлович*, д-р геогр. наук, проф., декан Гидрологического факультета РГГМУ
- Дубцов Алексей Леонидович*, магистрант каф. гидрологии Томского государственного университета
- Ефремова Татьяна Владимировна*, науч. сотр., канд. геогр. наук, ФГБУН ИВПС КарНЦ РАН
- Жирков Иннокентий Иннокентьевич*, канд. геогр. наук, проф., Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, каф. географии института Естественных наук
- Жумангалиева Зария Маратовна*, аспирантка каф. Гидрологии суши РГГМУ
- Зверев Илья Сергеевич*, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. лаборатории методов математического моделирования, Институт озераведения РАН
- Земцов Валерий Алексеевич*, д-р геогр. наук, проф., зав. каф. гидрологии Томского государственного университета
- Иванов Роман Вячеславович*, директор УНИЦ ТБА ГУАП
- Игнатьева Наталья Викторовна*, канд. геогр. наук, зав. Лабораторией гидрохимии ИНОЗ РАН
- Кирвель Иван Иосифович*, д-р геогр. наук, проф. Поморской Академии г. Слупск, Польша
- Кирвель Павел Иванович*, канд. геогр. наук, доц., Институт Информационных Технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники
- Киселев Евгений Юрьевич*, мл. науч. сотр. Института озераведения РАН
- Кокорин Валерий Иванович*, зам. нач. отдела, главный конструктор Департамент проектно-конструкторских работ ЗАО «МОРСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»
- Кондратьев Сергей Алексеевич*, д-р физ.-мат. наук, Институт озераведения РАН
- Кулбаев Кайрат Муратович*, магистр гидрометеорологии, науч. сотр. ТОО «Института география»
- Мадибеков Азамат Сансызбаевич*, канд. геогр. наук, науч. сотр. лаборатории «Гидрология водоемов» ТОО «Института география»
- Мякишева Наталья Вячеславовна*, д-р геогр. наук, проф. каф. Гидрологии суши РГГМУ
- Назарова Лариса Евгеньевна*, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук, ФГБУН ИВПС КарНЦ РАН
- Науменко Михаил Арсеньевич*, д-р геогр. наук, проф., зав. Лабораторией гидрологии Института озераведения РАН
- Нестеров Николай Аркадьевич*, д-р техн. наук, зав. лаб. географии и природопользования Института Озераведения РАН
- Пальшин Николай Иннокентьевич*, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук, ФГБУН ИВПС КарНЦ РАН
- Родионов Владимир Зинонович*, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр., ФГУН СПб НИЦЭБ РАН

Румянцев Владислав Александрович, д-р геогр. наук, проф., акад. РАН, директор Института озера-
роведения РАН
Руховец Леонид Айзикович, д-р физ.-мат. наук., проф., Санкт-Петербургский институт экономики
и математики РАН
Рыбакин Владимир Николаевич, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. Института озера-
роведения РАН
Сапелко Татьяна Валентиновна, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. Лаборатории географии и
природопользования Института озера-
роведения РАН
Сутырина Екатерина Николаевна, канд. геогр. наук, доц. ФГБОУ ВПО Иркутского государ-
ственного университета
Тарасов Александр Сергеевич, магистрант каф. гидрологии Томского государственного универ-
ситета
Турсунов Эскандер Абаевич, канд. геогр. наук, зав. лабораторией «Гидрология водоемов» ТОО
«Института география»
Угренинов Геннадий Николаевич, канд. техн. наук, доц. каф. гидрометрии РГГМУ
Фашевский Борис Владимирович, канд. геогр. наук, проф. Международного экологического
университета им. А.Д. Сахарова, Беларусь
Филатов Николай Николаевич, член.-корр. РАН, советник РАН, г.н.с. ФГБУН ИВПС КарНЦ
РАН
Шипунова Екатерина Александровна, ст. инженер лаборатории методов математического моде-
лирования, Институт озера-
роведения РАН
Шмакова Марина Валентиновна, канд. техн. наук, Институт озера-
роведения РАН

Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала

1. Материал, предлагаемый для публикации, должен являться оригинальным, неопубликованным ранее в других печатных изданиях. Объем статьи может составлять до 1,5 авторских листов (1 а.л. равен 40 тыс. знаков), в исключительных случаях по решению редколлегии – до 2 авторских листов.
2. На отдельной странице приводятся сведения об авторе (авторах) на русском и английских языках: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность и место работы, контактные телефоны, адрес электронной почты. Плата за опубликование рукописей с аспирантов не взимается.
3. Аннотация статьи объемом до 7 строк на русском и английском языках не должна содержать ссылок на разделы, формулы, рисунки, номера цитируемой литературы.
4. Список литературы должен содержать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок.
5. Пронумерованный список литературы (в алфавитном порядке, сначала на русском, затем на иностранных языках) приводится в конце статьи на отдельной странице с обязательным указанием следующих данных: для книг – фамилия и инициалы автора (редактора), название книги, место издания (город), год издания; для журнальных статей – фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, выпуск, страницы (первая и последняя). Разрешается делать ссылки на электронные публикации и адреса Интернет с указанием всех данных.
6. Оформление ссылок в тексте: в квадратных скобках [] указать порядковый номер литературы. Если при цитировании делается ссылка на конкретную цитату, формулу, теорему и т.п., следует указывать номер страницы: [13, с. 23].
7. Сноски помещаются на соответствующей странице текста.
8. Таблицы и другие цифровые данные должны быть тщательно проверены и снабжены ссылками на источники. Таблицы приводятся в тексте статьи, номер и название указываются над таблицей.
9. Названия зарубежных компаний приводятся в тексте без кавычек и выделений латинскими буквами. После упоминания в тексте фамилий зарубежных ученых, руководителей компаний и т.д. на русском языке, в полукруглых скобках приводится написание имени и фамилии латинскими буквами, если за этим не следует ссылка на работу зарубежного автора.

**Рекомендации по форматированию
для подачи рукописи в редакционно-издательский отдел**

Формат А5 (148×210) книжный.

Поля: верхнее – 1,8 см; нижнее – 2,3 см; левое – 1,8 см; правое – 1,8 см.

От края до верхнего колонтитула – 0 см, до нижнего колонтитула – 1,8 см.

Колонцифры внизу в зеркальном положении – 10, обычным шрифтом, начинать с титульного листа.

Набрать текст шрифтом Times New Roman, обычный.

Межстрочный интервал – одинарный.

Абзацный отступ – 0,75 см.

Интервал до заголовка – 24 пункта, после – 6.

Размер шрифта: основной текст – 11, таблицы – 9.

Лежачие таблицы поместить в отдельный файл на формат А5 альбомный, поля: верхнее, нижнее и правое – 1,8 см, левое – 2,3 см, шрифт – 9.

Рисунки располагать по тексту в соответствии со ссылкой.

Подрисуючную подпись набрать шрифтом – 9.

В формулах русские буквы прямые, латинские – курсивные, греческие – прямые, тригонометрические функции (sin, cos и др.) набирать прямым шрифтом.

Литература – шрифт 9.

Оглавление поместить в конце рукописи – шрифт 9.

Требования к оформлению статьи для публикации в Ученых записках

Инициалы и фамилии авторов на русском языке.

Название на русском языке.

Аннотация на русском языке.

Ключевые слова на русском языке.

Инициалы и фамилии авторов на английском языке.

Название на английском языке.

Аннотация на английском языке.

Ключевые слова на английском языке.

Формат 17×24 книжный.

Поля зеркальные: верхнее и нижнее – 2,3 см; левое и правое – 1,8 см.

От края до верхнего колонтитула и нижнего колонтитулов – 1,8 см.

Внимание!

Авторская правка в верстке – компенсационная, до пяти буквенных исправлений на странице.

Научное издание

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 34

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

Редактор: И.Г. Максимова
Компьютерная верстка: Ю.И. Климов

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 09.06.14. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,0. Тираж 500 экз. Заказ № 315.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано в ЦОП РГГМУ

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
