THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE OF THE KARELIAN RESEARCH CENTRE
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
THE INSTITUTE OF LYMNOLOGY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN
RESEARCH INSTITUTE FOR PROBLEMS OF ECOLOGY AND MINERAL WEALTH USE OF TATARSTAN ACADEMY OF SCIENCES
THE MINISTRY OF ECOLOGY AND NATURAL RESOURCES
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN
VOLGA-KAMA STATE NATURAL BIOSPHERE RESERVE
BRANCH OF THE RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY
IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN
REPUBLICAN SOCIAL MOVEMENT "TATARSTAN - A NEW CENTURY"
UNESCO CHAIR «APPLICATION OF THE FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF THE EARTH CHARTER TO CREATE A SUSTAINABLE COMMUNITY»

LAKES OF EURASIA: PROBLEMS AND SOLUTIONS

PROCEEDING
II INTERNATIONAL CONFERENCE
May 19-24, 2019

Part 1

KAZAN
2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА КарНЦ РАН
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИИ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ АН РТ
МИНИСТЕРСТВО ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ВОЛЖСКО-КАМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ БИОСФЕРНЫЙ
ЗАПОВЕДНИК
ОТДЕЛЕНИЕ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА
В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН
РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ОБЩЕСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
«ТАТАРСТАН - НОВЫЙ ВЕК» – «ТАТАРСТАН - ЯҢА ГАСЫР»
КАФЕДРА ЮНЕСКО «РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРИНЦИПОВ ХАРТИИ
ЗЕМЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТОЙЧИВОГО СООБЩЕСТВА»

ОЗЕРА ЕВРАЗИИ:
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

МАТЕРИАЛЫ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
19 – 24 мая 2019 г.

Часть 1

КАЗАНЬ
2019

УДК 556.55(4/5)(063)
ББК 26.222.6
О-46

Редакционная коллегия
Р.Р. Шагидуллин, Н.Н. Филатов, Ш.Р. Поздняков, Д.В. Иванов

Рецензент
Академик РАН В.А. Румянцев

Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II Международной конференции (19–24 мая 2019 г.). – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2019. – Ч. 1. – 355 с.
ISBN 978-5-9690-0526-6

В книге представлены результаты теоретических исследований, практического использования, охраны и управления ресурсами озер Евразии. Рассмотрены Великие озера Евразии: Байкал, Ладожское, Онежское, Телецкое, Чаны, Улянсухэй и разнообразные озера Арктики и субарктики, бореальной и аридной зон. Основной акцент при организации конференции и подготовке сборника был сделан на то, чтобы рассмотреть наиболее актуальные вопросы лимнологии и возможные пути решения теоретических и практических проблем озер на обширной территории Евразии с учетом необходимости развития тесного международного сотрудничества. Важной задачей конференции является консолидация ученых разных стран Евразии, БРИКСа для получения новых научных знаний, объединение усилий для решения практических проблем трансграничных озерно-речных систем, обоснования возможного перераспределения водных ресурсов, обоснование рационального использования и охраны озер Евразии.

This volume of collected papers was compiled of the proceedings of the II International Conference «Lakes of Eurasia: Problems and Solutions», Kazan, 19-24.05.2019. The volume presents the results of theoretical studies, practical use, conservation and resource management of various lakes of Eurasia. Great Eurasian lakes (Baikal, Ladoga, Onego, Teletskoye, Chany, Wuliangsuhai) and diverse lakes of the arctic and subarctic regions, the boreal and arid zones are considered. The key idea in organizing the conference and preparing these proceedings was to address the most pressing issues of limnology and offer potential solutions for theoretical and practical problems of lakes in the vast territory of Eurasia, keeping in mind the need for close international cooperation. An important mission for the 1st conference is to consolidate the efforts of scientists from different Eurasian and BRICS countries in obtaining new knowledge and handling the real problems of transboundary lake-river systems, substantiating possible redistributions of water resources, sustainable management and conservation of Eurasian lakes.

Издание материалов осуществлено при финансовой поддержке Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан.

ISBN 978-5-9690-0526-6

© Авторы докладов, 2019
© Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 2019
© Министерство экологии и природных ресурсов РТ, 2019

Filatov N.N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., PalshinN. Climate changes on the watershes of lakes Onego and Ladoga based on the remote sensing and in-situ data observations // J. Inland waters. DOI 10.1080/20442041.2018.1533355.

Filatov N.N., Kalinkina N.M., Tekanova E.V. Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming // Limnology and Freshwater Biology. 2018 (1): 15-17.

Frolov A.V., Vyruchalkina T.Yu. Dynamic-stochastical modeling of long-term fluctuations in Lake Baykal levels and Angara River runoff // Water Res. 2017. V. 44, Is. 3. P. 380–389.

Gronewold A.D., Fortin V., Lofgren B., Clites A., Stow C.A., Quinn F. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective // Climatic Change. 2013. 120: 697–711.

DIAGNOSIS AND PREDICTION OF HYDRODYNAMIC AND ECOSYSTEMS OF THE LARGEST LAKES OF EURASIA

N.N. Filatov, T.Yu. Vyruchalkina, S.D. Golosov, A.V. Gusev, N.A. Diansky, G.S. Dyakonov, I.S. Zverev, R.A. Ibraev, A.V. Isaev, O.P. Savchuk, V.V. Fomin, A.V. Frolov

The problems of long-term forecasting of the hydrological regime and ecosystems of the largest lakes of Eurasia (Ladoga, Onego, Caspian and Baikal) are considered. Diagnostic and prognostic evaluations of possible changes in ecosystems up to 2045–2085 were made. Studies on the diagnosis and prediction of changes in ecosystems (hydrophysical processes, primary production, biogeochemical flows of matter) of Lake Ladoga and Onego lakes were carried out using 3-D mathematical models created (or / and adapted). Recommendations on the use of research results for solving practical problems are given.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕКИ СЕЛЕНГИ НА ДИНАМИКУ ОСЕННЕГО ТЕРМОБАРА В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Б.О. Цыденов

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Проведена оценка влияния реки Селенги (стокового течения и соленостного режима) на динамику термобара в период осеннего выхолаживания озера Байкал. Анализ результатов моделирования показал, что на начальной стадии развития термобара доминирующее значение имеет динамический напор стока. Однако по мере удаления фронта термобара от устья реки начинает возрастать роль минерализации притока.

Термобар, возникающий в озерах умеренных широт весной и осенью и представляющий собой узкую зону погружения вод в окрестности температуры максимальной плотности, играет важнейшую роль в экосистеме димиктического водоема [Moll et al., 1993; Шимараев и др., 1995; Holland, Kay, 2003]. Значение термобара в экологическом функционировании озера многогранно. Термобар делит озеро на теплоактивную (располагается в прибрежной части водоема) и теплоинертную (в открытой части водоема) области [Тихомиров, 1982] и служит барьером, ограничивающим распространение прибрежных вод с высокой концентрацией загрязнителей и биоты в центральную часть [Moll et al., 1993; Likhoshway et al., 1996].

Ключевую роль в формировании термобара в Байкале играют речные притоки [Likhoshway et al., 1996]. Река Селенга и ее дельта оказывают влияние на физические, химические, биологические свойства вод прилегающих районов озера Байкал

[Sherstyankin et al., 2007], на строение рельефа и донных осадков, рыбное население и биоту [Maksimenko et al., 2008; Иванов, 2012].

Сроки начала осенней гомотермии (явления однородности температуры по глубине) в озере Байкал колеблются в разные годы от середины октября до начала – середины ноября, а сроки ее окончания – от первой до последней декады ноября, причем на мелководных участках охлаждение водной толщи происходит гораздо быстрыми темпами [Шимараев, 1977]. Осенний термобар на Селенгинском мелководье начинается на протоке Харауз [Sherstyankin et al., 2007].

Целью настоящей работы является изучение влияния стока реки Селенги (динамического напора и соленостного режима) на поведение осеннего термобара в озере Байкал.

Негидростатическая модель для воспроизведения термогидродинамических процессов в глубоком озере, учитывающая влияние силы Кориолиса, связанной с вращением Земли, и записанная в приближении Буссинеска включает в себя следующие уравнения [Tsydenov et al., 2016]:

а) *уравнения количества движения*

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial uw}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial u}{\partial z}\right)+2\cdot\Omega_z v-2\cdot\Omega_y w;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial uv}{\partial x}+\frac{\partial wv}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial v}{\partial z}\right)+2\cdot\Omega_x w-2\cdot\Omega_z u;$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial uw}{\partial x}+\frac{\partial w^2}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial w}{\partial z}\right)-g\cdot\frac{\rho}{\rho_0}+2\cdot\Omega_y u-2\cdot\Omega_x v;$$

б) *уравнение неразрывности*

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0;$$

в) *уравнение энергии*

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial wT}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{1}{\rho_0 c_p}\frac{\partial H_{sol}}{\partial z};$$

г) *уравнение баланса солёности в озере*

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial uS}{\partial x}+\frac{\partial wS}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial S}{\partial z}\right),$$

где u, v – горизонтальные компоненты скорости; w – вертикальная компонента скорости; Ω_x, Ω_y и Ω_z – компоненты вектора угловой скорости вращения Земли; g – ускорение свободного падения; c_p – удельная теплоёмкость; T – температура; S – солёность; p – давление; ρ_0 – плотность воды при стандартном атмосферном давлении, температуре T_L и солёности S_L (T_L и S_L – характерная температура и солёность озера соответственно). Коротковолновая солнечная радиация, проникающая в воду, рассчитывается по закону Бугера–Ламберта–Бэра

$$H_{sol}=H_{Ssol,0}\cdot\exp\left(-\varepsilon_{abs}d\right),$$

где $H_{Ssol,0}$ – поток солнечной радиации на свободной поверхности, ε_{abs} – коэффициент поглощения, $d = |L_z - z|$ – глубина.

Замыкание системы уравнений осуществляется с помощью двухпараметрической k–ω модели Уилкокса или же алгебраических соотношений для коэффициентов турбулентной диффузии [Цыденов, Старченко, 2014]. Уравнение состояния [Chen, Millero, 1986] связывает плотность воды с температурой, солёностью, давлением и справедливо в диапазоне $0 \le T \le 30$ °C, $0 \le S \le 0.6$ *г/кг*, $0 \le p \le 180$ *бар*.

Область исследования представляет собой поперечное сечение на границе южной и средней котловин озера Байкал: пр. Харауз – м. Красный Яр (рис. 1а). Данные о рельефе дна, соответствующие указанному сечению, взяты из [Тарасова, 1975] (рис. 1б). Селенгинское мелководье расположено между 51.9º – 52.5º с. ш. и 106.1º – 106.9º в. д., представляет собой отмель в виде мощного конуса, сформировавшегося в результате аккумуляции наносов на придельтовом пространстве Байкала [Синюкович, 2004].

Вычислительная область имеет протяженность 10 км и глубину 66 м (рис. 1б). Глубина открытого участка речного стока (на левой границе) составляет 7.5 м. Расчётная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами $h_x = 12.5$ м и $h_z = 1.5$ м. Шаг по времени – 30 с.

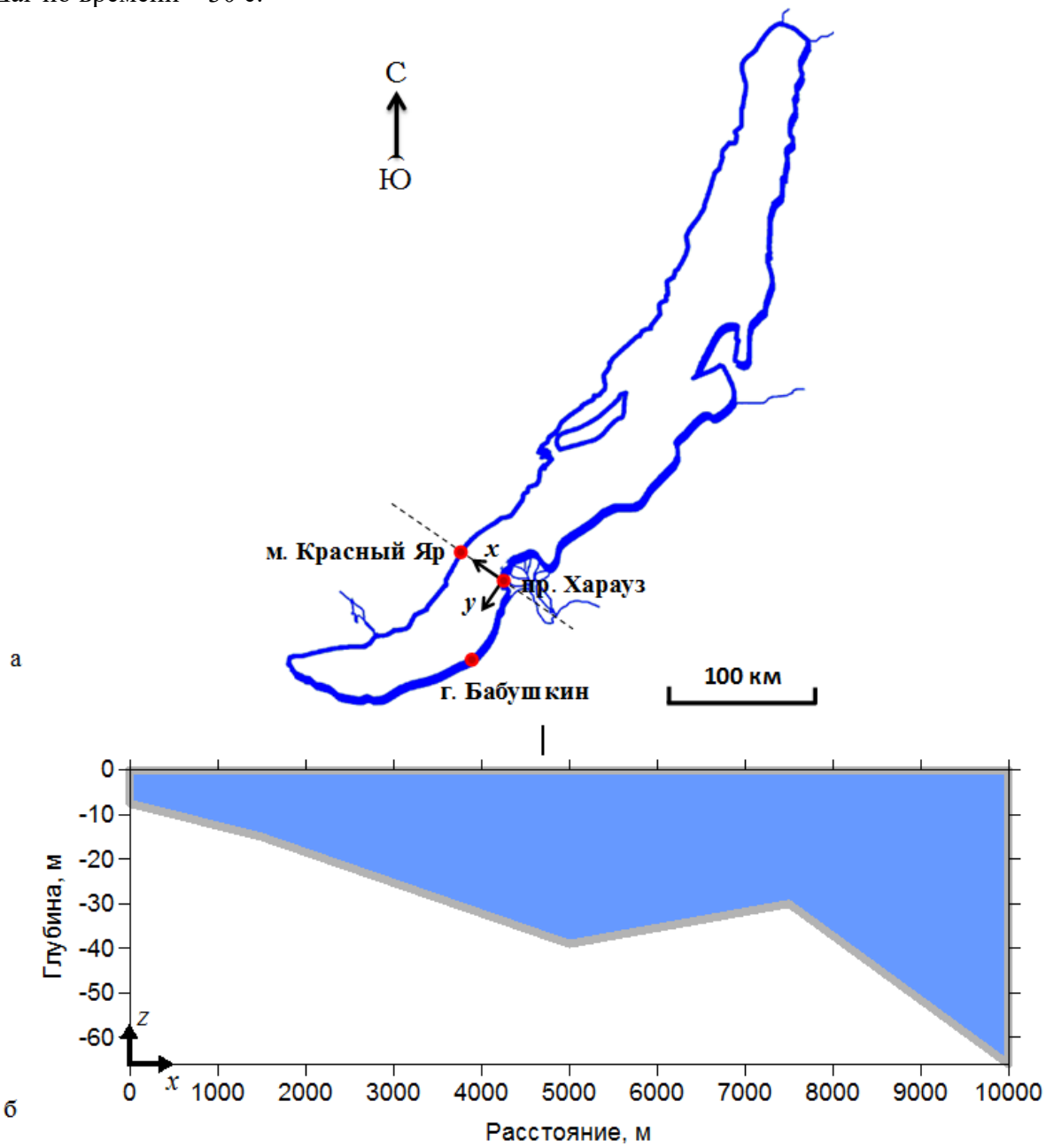

Рис. 1. Протока Харауз – м. Краный Яр: а – схема разреза; б – вычислительная область

Принятое в модели вертикально неоднородное распределение приближенно соответствует среднемноголетним средним значениям температуры воды в южной котловине озера Байкал в октябре месяце [Shimaraev et al., 1994]. Температура воды речного притока равномерно уменьшается с 2 до 1 °С, что отражает реальный термический режим пр. Харауз в моделируемый период [Sherstyankin et al., 2007]. Минерализация воды в озере (S_L) составляет 96 мг/кг [Shimaraev et al., 1994], в реке (S_L) варьируется от 185 до 200 мг/кг [Sherstyankin et al., 2007]. Скорость впадения пр. Харауз в оз. Байкал принята равной 0.2 см/с [Верболов, 1978]. Компоненты тепловых потоков, поступающих на водное зеркало, вычислены по расчетным формулам, приведенным в работе [Tsydenov, 2018], на основе данных по температуре воздуха, относительной влажности, атмосферному давлению, облачности из архива погодных условий метеостанции г. Бабушкин в период с 1 по 30 ноября 2015 г. Составляющие касательного напряжения трения ветра в вычислительных экспериментах приняты равными нулю.

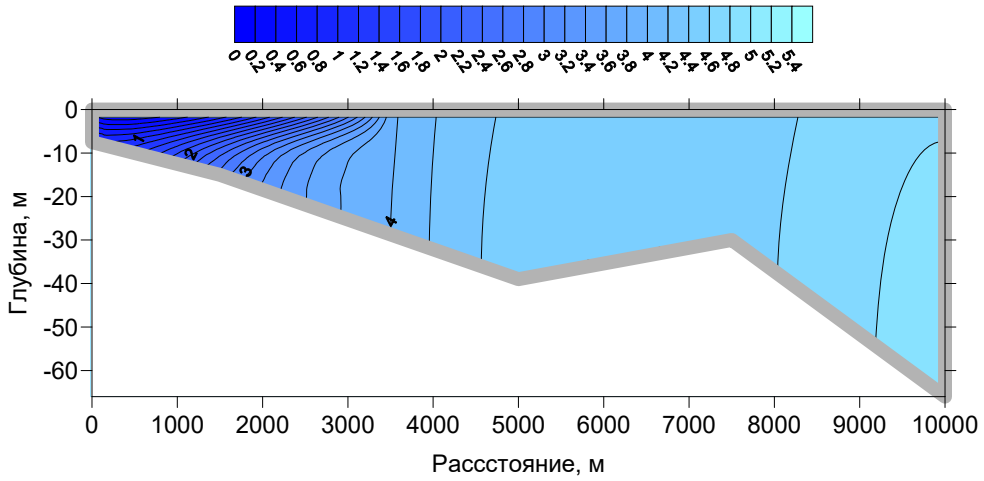

Рис. 2. Изотермы после 16 суток моделирования

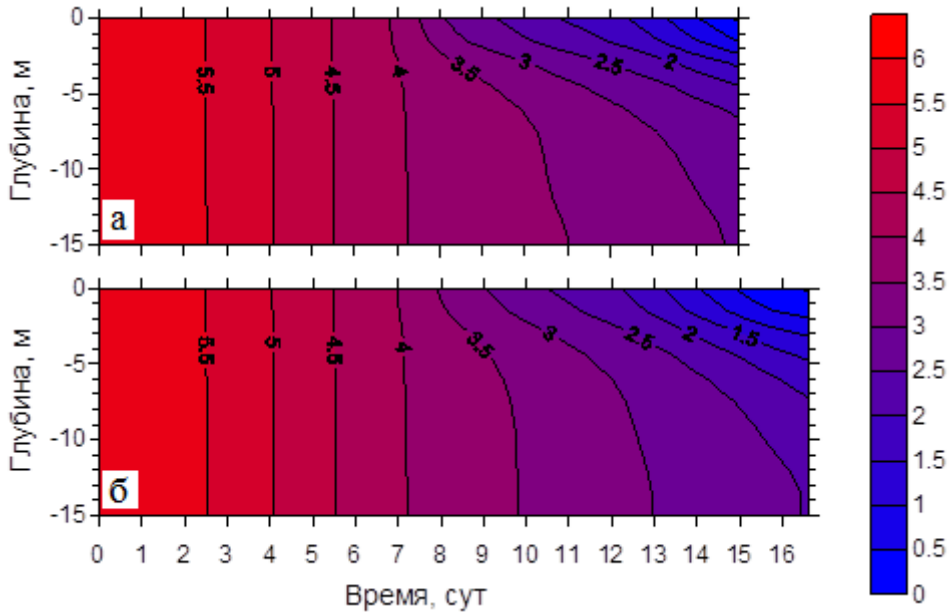

Рис. 3. Хроноизоплеты распределения температуры (°С) на расстоянии x = 1500 м при различной минерализации вод речного притока: а) S_R=S_L=96 мг/кг, б) 180 мг/кг ≤ S_R ≤ 200 мг/кг

Расчеты показали, что в теплоинертной области наблюдается гомотермия (рис. 2). В теплоактивной области изотермы сгущены и имеют наклонный характер, происходит охлаждение поверхностных слоев с образованием зональности с обратной температурной стратификацией.

Отсутствие существенных различий в распределении температуры по глубине (на разрезе x = 1500 м) на протяжении первых 7 суток (рис. 3) свидетельствует о том, что основным фактором развития термических процессов в мелководье на начальной стадии эволюции термобара является речной сток, создающий динамический напор от устья реки к центру озера.

По мере дальнейшего выхолаживания водоема начинает возрастать роль минерализации притока. Поступающая вместе с водами Селенги относительно высокая концентрация главных ионов замедляет охлаждение водной поверхности (рис. 3б).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-00017).

Литература

Верболов В.И. Динамика вод // Проблемы Байкала / ред. Г.И. Галазий, К.К. Вотинцев. Новосибирск: Наука, 1978. С. 87–102.

Иванов В.Г. Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал): Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Иркутск, 2012. 24 с.

Синюкович В.Н., Жарикова Н.Г., Жариков В.Д. Сток реки Селенги в ее дельте // География и природные ресурсы. 2004. №3. С. 64–69.

Тарасова Е.Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 147 с.

Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.

Цыденов Б.О., Старченко А.В. Применение двухпараметрической k–ω модели турбулентности для исследования явления термобара // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2014. № 5(31). С. 104–113.

Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука. 1977. 149 с.

Шимараев М.Н., Грачев М.А., Имбоден Д.М., Окуда С., Гранин Н.Г., Кипфер Р., Левин Л.А., Эндо Ш. Международный гидрофизический эксперимент на Байкале: процессы обновления глубинных вод в весенний период // Докл. РАН. 1995. Т. 343, №6. С. 824–827.

Chen C.T., Millero F.G. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnologies range // Limnol. Oceanogr. V. 31, №3. 1986. P. 657–662.

Holland P. R., Kay A. A review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation // Limnologica. 2003. V. 33, №3. P. 153–162.

Likhoshway Y.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G., Potyemkin V L., Shimaraev M.N. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 1996. V. 22, №1. P. 5–14.

Maksimenko S.Y., Zemskaya T.I., Pavlova O.N., Ivanov V.G., Buryukhaev S.P. Microbial community of the water column of the Selenga River-Lake Baikal biogeochemical barrier // Microbiology. 2008. V. 77, №5. P. 587–594.

Moll R.A., Bratkovich A., Chang W.Y.B., Pu P. Physical, chemical, and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front // Estuaries. 1993. V. 16, №1. P. 92–103.

Sherstyankin P.P., Ivanov V.G., Kuimova L.N., Sinyukovich V.N. Formation of waters of the Selenga shallow waters taking account of the seasonal variations in river runoff, thermal convection, and thermobars // Water Resources. 2007. V. 34, №4. P. 408–414.

Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical Limnology of Lake Baikal: a Review. Irkutsk–Okayama, 1994. 81 p.

Tsydenov B.O. Numerical modeling of the effect of inflow water mineralization in the dynamics of the autumnal thermal bar in Kamloops Lake // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. V. 73, №4. P. 435–440.

Tsydenov B.O., Kay A., Starchenko A.V. Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // Ocean Modelling. 2016. V. 104. P. 73–83.

A NUMERICAL STUDY OF THE IMPACT OF THE SELENGA RIVER ON THE AUTUMNAL THERMAL BAR DYNAMICS IN LAKE BAIKAL

B.O. Tsydenov

The impact of the Selenga River inflow (runoff current and salinity regime) on the thermal bar dynamics during the autumnal cooling of Lake Baikal is evaluated. The analysis of the results of numerical simulation shows that in the initial stage of the thermal bar development, the most significant is the dynamic force of the river inflow. However, with the distance increase between the thermal bar front and the river mouth, the role of the river mineralization also increases.

ПОСЛЕДСТВИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ТРАНСГРАНИЧНОЙ СИСТЕМЕ БАССЕЙНОВ РЕКИ АРГУНЬ И ОЗЕРА ДАЛАЙНОР

А.В. Шаликовский, Д.А. Шаликовский, А.А. Солодухин

Восточный филиал Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов

Озеро Далайнор (КНР) характеризуется циклическими изменениями уровня воды. За период 1999-2009 гг. снижение уровня составило 4,6 м. В 2009 г. начала осуществляться переброска части стока р. Хайлар в оз. Далайнор и к 2016 г. уровень воды в озере поднялся на 3,5 м, а затем вновь стал понижаться. Переброска стока привела к кардинальному изменению гидрологического режима на пограничном участке р. Аргунь. Антропогенное снижение стока р. Аргунь оценивается в 1,7-1,8 км^3 в год (более половины среднегодового стока р. Аргунь в пограничном створе). Наиболее значительное влияние переброска стока оказывает на экосистему поймы реки.

Озеро Далайнор (Хулун-Нуур, Хулуньчи), являющееся пятым по величине пресноводным озером в КНР, расположено на плоскогорье Барга на севере Внутренней Монголии. В озеро впадают реки Керулен и Оршун-Гол (Вюрсун), а также более 60 малых, периодически пересыхающих рек. Озеро периодически изменяет свои размеры. Максимальные морфометрические характеристики за период наблюдений: площадь акватории – 2339 км^2; протяженность с северо-востока на юго-запад – 93 км, с северо-запада на юго-восток – 41 км; длина береговой линии – 375 км; объем – 13,85 км^3; средняя глубина – 5,92 м; максимальная глубина – 8 м.