

УДК 502.7 + 577.4

ОБ УСЛОВИЯХ ПРОТЕКАНИЯ ЦИКЛОВ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕЛЕЦКОМ ОЗЕРЕ: АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Цхай^{1,2}, М.А. Романов³

¹ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, E-mail: tskhai@iwerp.ru*

² *Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул*

³ *Алтайский государственный университет, г. Барнаул*

Объектом исследования является Телецкое озеро. Цель работы – анализ существующей исходной информации для моделирования циклов биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора в объекте исследования. Выполненное в данной работе обзорное исследование может служить фактологической основой для моделирования состояния водной экосистемы Телецкого озера.

Ключевые слова: Телецкое озеро; математическая модель; лимнология; метеорология; гидрология; гидрохимия; гидробиология; трансформация; биогеохимический цикл.

DOI:10.24412/2410-1192-2023-17104

Дата поступления: 24.10.2023. Принята к печати: 20.11.2023

В соответствии с Указом¹ Президента Российской Федерации о том, что жизнедеятельность и развитие к числу целевых природных экосистем определяется показателей, характеризующих достижение национальных целей к 2030 году, численности населения, численности и отнесено экологическое оздоровление трех водных объектов, в том числе Телецкого озера (ТО). В этой связи переоценить актуальность исследования, оценки и моделирования химического состава ТО – уникального природного хранилища чистой пресной воды – невозможно.

Цель данной работы – анализ существующей исходной информации для моделирования циклов биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора в ТО.

В настоящий момент исследователями в мире широко используется положение

о том, что жизнедеятельность и развитие природных экосистем определяется лимитирующими факторами, в том числе недостатком пищи (ограничением по субстрату). Такое предположение позволяет редуцировать проблему оценки состояния водных экосистем к задаче воспроизведения природных биогеохимических циклов трансформации биогенных элементов, прежде всего азота и фосфора. В этом смысле фактический смысл моделирования состояния экосистемы сводится к решению математических задач, полученных из законов сохранения массы, для каждого компонента круговорота определяющих биогенных элементов в рассматриваемых конкретных природных условиях.

¹ Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. N 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» // Российская газета. Федеральный выпуск. 22 июля 2020 г. №159(8213).

Для эффективного анализа и моделирования сложного объекта, каким является экосистема ТО, требуется синхронизированная информация за репрезентативный период по основным гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям. К сожалению, приходится констатировать, что информационного обеспечения, достаточного для достижения цели нашей работы, на текущий момент для ТО – нет, хотя исследования в этом направлении ведутся, начиная с работ В.В. Селегея в 60–70-е годы XX века [Селегей, Селегей, 1978] и далее [Васильев и др., 1996; Зиновьев и др., 2012; Пузанов и др., 2019]. Однако, полнота информации, полученной в их рамках, для моделирования циклов биогенных элементов оставляет желать лучшего.

Поэтому для разработки соответствующего модельного подхода целесообразно использовать сценарный путь на основе анализа мониторинговых данных Государственной системы наблюдений Росгидромета с учетом особенностей экосистемы ТО, охарактеризованных в существующих публикациях.

Особенности морфометрии объекта исследований

Телецкое озеро (ТО) занимает 5-е

место в России по глубине (табл. 1). Его ложе образовано грабеноподобной относительно узкой расщелиной тектонического происхождения. Берега ТО, окруженные горами, обрывистые и скалистые, имеют волноприбойные заливы и мысы. Принято выделять два плеса ТО: меридиональный глубоководный (100–300 м) от устья р. Чулышман до мыса Караташ и широтный мелкоководный от этого мыса до истока р. Бия. Меридиональный отличается трапециевидной формой с относительно ровным дном и крутыми (60–70°) подъемами. Широтный сужается к р. Бия неширокой полосой с относительно волнообразным рельефом дна [Селегей, Селегей, 1978].

Метеорологические условия

Местоположение ТО отличает своеобразный лимноклимат, определяемый локальными метеорологическими факторами (характеристики местных ветров, осадков, ледово-термических условий, туманов и пр.), который в основном зависит от физико-географических условий объекта. Можно выделить градиенты от южной оконечности ТО – к северо-западному участку: снижения температуры воды, удлинения продолжительности ледового покрова, высоты и продолжительности снежного покрова, снижения среднегодовых температур воздуха.

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики ТО [Селегей, Селегей, 1978]

Table 1

The main morphometric characteristics of Lake Teletskoye [Selegej, Selegej, 1978]

Площадь зеркала, км ²	Длина, км	Ширина, км		Глубина, м		Объем, км ³	Длина береговой линии, км	Развитие береговой линии, км
		средняя	максимальная	средняя	максимальная			
223	77.8	2.9	5.2	174	325	40	181	3.3

Большая открытость широтной части ТО циклональным переносам определяет названные климатические особенности. Неслучайно совпадение перечисленного с направлением антициклонального переноса теплых воздушных масс,двигающихся в долину ТО со стороны устья р. Чулышман. Летом среднемесячная скорость ветра составляет около 1.0 м/с. В осенне-зимний период наблюдается ее увеличение – до приблизительно 3.0 м/с. В холодный период года по диапазону температур воздуха характеризуемая часть ТО с устьем р. Чулышман являются самым теплым местом Южной Сибири. При этом температурный режим воздуха в долине ТО отличают высокая внутрисуточная и внутримесячная изменчивость, вертикальная и латеральная неустойчивость. Годовая интенсивность солнечной радиации в котловине ТО оценивается как 85.1 (ккал/см²/год) при максимальном значении в июне-июле – около 14.0 (ккал/см²/мес). Среднегодовой радиационный баланс составляет примерно 27.0 ккал/см² и определяется прозрачностью атмосферы (в среднем 0.76 в году), облачностью (6.8 балла), а также наличием туманов испарения, а также конденсации. Для учета особенностей ТО можно использовать актинометрические и метеорологические данные специализированной станции в пос. Яйлю [Селегей, Селегей, 1978].

Гидрологические условия

Основные гидрологические характеристики ТО таковы: среднемноголетний уровень воды – 433.8 м со среднегодовой амплитудой колебаний около 3.5 м

(максимально – 6.2 м). Четко выражены характерные периоды: относительно быстрое (40–50 дней) половодье; длительная (около 140 дней) летне-осенняя межень (июнь-октябрь), с частыми дождевыми паводками, затем устойчивая продолжительная (порядка 155 дней) зимняя межень (конец октября – начало апреля). ТО принадлежит к умеренному типу водных объектов по гидротермическим условиям. Здесь дважды в год после ледового периода весной и перед замерзанием осенью появляется термическая неустойчивость и наблюдается термическая конвекция (вертикальная циркуляция вод). В течение года имеют место два периода повышения температуры и два – снижения. Температура относительно холодной воды ТО (около 0.5°C, на глубине до 4°C) летом заметно увеличивается, в среднем, до 16°C на поверхности. В первой половине осени температура воды снижается до приблизительно 9°C, но становится выше температура глубоких слоев ТО. Годичный термический цикл завершает осенняя гомотермия [Дучков и др., 1995]. Среднемесячные температуры воды в ТО, усредненные за 23 года (1953–1976 гг), приведены в монографии [Селегей, Селегей, 1978].

Полный ледостав на ТО периодически отсутствует. Широтная часть ТО замерзает каждый год, в основном, в январе, а меридиональная – примерно раз в три года (за последние 45 лет). Толщина льда в среднем – 35 см. Период ледообразования растягивается часто на 4 месяца (ноябрь – март), а его разрушение на 2 месяца

(с середины марта). Для ТО характерны ветровые, гравитационные, конвективные (разноплотностные), компенсационные (сейшевые) стоковые течения. Последние могут накладываться друг на друга, увеличивая амплитуду, но могут действовать и разнонаправленно.

ТО – проточное, в него впадает порядка 70 средних и малых рек, а вытекает р. Бия. Площадь водосбора ТО составляет примерно 20 тыс. км² и представляет собой горную область, вытянутую на 235 км с юго-востока на северо-запад. Самый крупный из притоков ТО – р. Чулышман, более мелкие – реки Кыга, Кокши, Колдор и др.

Гидрофизические процессы в Телецком ТО с точки зрения моделирования биогенных циклов достаточно хорошо изучены, и это знание продолжает углубляться [Zinoviev, 1994; Квон, 1998; Квон и др., 2000а; Квон и др., 2000б; Зиновьев, 2002; Бочаров и др., 2003; Зиновьев и др., 2005; Афанасьев, 2006; Зиновьев и др., 2010; Данчев, 2013; Пушистов, Викторов, 2016; Зиновьев и др., 2021; Koshelev et al, 2021]. Перечень источников – неполный, перечисленные работы отличаются тем, что содержат информацию, которая может пригодиться при дальнейшем моделировании трансформации питательных веществ.

ТО относится к стоково-проточным водоемам. Для оценки внутригодового водообмена предназначен водный баланс ТО, который был рассчитан в Российском государственном гидрометеорологическом университете в Санкт-Петербурге, под руководством профессора Н.Б. Барышникова [Рачкин, 2018]. Оценка

гидрометеорологических условий и определяемые ими характеристики водного режима ТО в упомянутой работе даны за гидрологический год (с 1 сентября 2015 года по 31 августа 2016 года). Также условными считаются временные границы гидрологических сезонов: осень (сентябрь – ноябрь), зима (декабрь – март), весна (апрель – июнь), лето (июль – август). Для описания ТО использованы данные гидрологических постов: Артыбаш, Кокши, Кыгинский залив и Яйлю.

Условия модельного года

Средняя температура воздуха осенью 2015 года была на 0.5°C выше нормы. Ее первые отрицательные значения имели место в середине октября. Далее неоднократно тепло в течение периода: октябрь – конец ноября возвращалось в широтной части ТО, и в первой и третьей декадах ноября – в остальных частях ТО. В связи с значительным похолоданием в третьей декаде ноября появились кратковременные ледовые образования в широтной части ТО. Ледовые явления проявились 28 ноября, что позже нормы на 9 дней. Продолжительность осенних ледовых явлений продлилась больше среднего периода на 3 дня.

На 0.2–0.8°C выше нормы оказались среднемесячные значения температуры воды. Температура воды опустилась ниже характерных отметок 10°C и 4°C, в основном, позже обычного в основной части акватории ТО, кроме стыка меридиональной и широтной частей, а также средин меридиональной и широтной частей ТО, соответственно. Выше

средних значений (136%) выпало осадков, большей частью – в сентябре, что привело к подъему уровня воды в ТО. Поверхностный приток в ТО был 107% нормы. На 2 см меньше нормы оказался средний уровень воды за сезон.

Теплой и малоснежной выдалась зима 2015–2016 гг.: средняя температура воздуха превысила среднемноголетние значения на 3.8°C, а количество осадков составило 56% от нормы. Среднесуточные значения температуры воздуха опустились ниже 0°C в конце декабря, но уже в первой декаде февраля температура воздуха достигла положительных значений.

В декабре в среднем на 0.9°C выше обычных значений была отмечена температура воды. Переход температуры воды через 0.2°C произошел в широтной части ТО на 3 дня раньше нормы.

Из-за теплой зимы ледовые явления образовались позже, чем обычно: на стыке широтной и меридиональной частей ТО – на 27 дней: только в виде сала – в отдельные дни, на юге меридиональной части ТО (в заливе) – на 21 день: только в виде припая и заберегов. В отмеченный год они и закончились раньше, чем обычно: на стыке – на 24 дня, на юге – на 43 дня. В широтной части ТО ледостав образовался на 12 дней позже нормы. Толщина льда в широтной части ТО была меньше нормы: с начала сезона – на 12 см, к его концу – на 4 см.

Объем поверхностного притока в ТО составил 118% нормы, а уровень воды ТО был на 25 см выше среднегодовой величины. Весенняя температура воздуха превысила норму на 1.5°C. Осадков выпало

больше среднегодовой величины – 122% нормы. Весной были только положительные температуры воздуха. В широтной части ТО разрушение и очищение ото льда были раньше, чем обычно, на 16 и 18 дней. Весенний подъем уровня воды в ТО начался в самом начале сезона, был затяжным, достиг максимального значения 9-го июня и был на 29 см выше среднегодовой величины указанной характеристики. Весной и даты перехода температуры воды наступили раньше нормы: через 0.2° в широтной части ТО – на 13 дней; через 4°C в широтной части – на 30 дней, на стыке широтной и меридиональной частей – на 22 дня, в середине и на юге меридиональной части – на 25 и 8 дней соответственно. Среднемесячные значения температуры воды были весь год выше нормы на 0.8–4.2°C.

Летом средний уровень воды был на 41 см выше среднегодовой величины указанной характеристики, поверхностный приток в ТО составил 135% нормы. Летняя температура воздуха была выше средней в этот сезон на 1.3°C. Осадков выпало 78% от среднегодовой величины указанной характеристики. Средняя за месяц температура воды превысила норму на 6.0°C в июле и на 2.6°C в августе. Средний уровень воды ТО был на 5 см выше нормы, а поверхностный приток в ТО составил лишь 98% от среднегодовой величины указанной характеристики.

Рассмотренный гидрологический год стал теплее среднемноголетнего на 2.0°C. Выпавшие осадки составили 105% нормы, по сезонам было: весна – 40%, лето – 23%, осень – 31%, зима – 6%. Среднегодовой

уровень воды был отмечен на 19 см выше нормы, а поверхностный приток в ТО составил 128% нормы.

Гидрохимические условия

Как отмечено в [Отчет...,1989]: «многолетние наблюдения химического состава воды ТО позволяют считать ее ультрапресной мягкой слабощелочной водой сульфатно-гидрокарбонатного магниево-натриево-кальциевого типа с выровненным по глубине гидрохимическим составом и газовым режимом». Как особенность химсостава воды ТО и его основных притоков отмечают сезонную динамику изменения составляющих, что более явно проявляется для речных вод. Во время весеннего половодья за счет влияния притока слабоминерализованных талых вод в водоемах отмечается уменьшение значений большей части физико-химических показателей, кроме растворенного кислорода, ХПК и т.п. [Природа..., 1967]. В ТО аналогичная сезонная динамика изменения химического состава воды наблюдается даже в зонах антропогенного влияния. Интересно, что величины индикаторов озерной воды обычно располагаются между значениями

характеристик для западных и восточных притоков ТО.

Питательные вещества в ТО представлены фосфором, кремнием, азотом и др. (первые два – см табл. 2). Их содержание является определяющим фактором трофического статуса водоема, поскольку биогены составляют основу рациона 1-го трофического уровня экосистемы – фитопланктона. Обычно считают, что лимитирующим элементом экосистемы ТО является фосфор. Содержание фосфатов в ТО невысокое – 0.01–0.30 г/м³ при среднем 0.02 г/м³. Повышение (до первых десятых долей мг/дм³) приурочено, как правило, к селитебным участкам и рекреационным зонам в северо-западной части ТО. Содержание кремния в озерной воде в среднем составляет 2.24 г/м³ при колебаниях от 2.1 до 3.9 г/м³. Отметим, что его распределение коррелируется с соответствующими характеристиками хлорофилла «а», а также азота и фосфора [Отчет...,1989].

Минеральный азот в воде ТО представлен в большей степени нитратами. Существенно меньше нитритов и аммонийных соединений. Диапазон концентраций названных соединений меняется значительно, максимален – в период весеннего половодья.

Таблица 2

Среднее содержание и отношение химических элементов в природных водах района ТО [Шевченко, 2010]

Table 2

The average content and ratio of chemical elements in the natural waters of the Teletskoye Lake area [Shevchenko, 2010]

Элементы	Среднее содержание по типам вод, г/м ³				Соотношение С : Р : О : П
	снеговая (С)	речная(Р)	озерная (О)	подземная (П)	
Si	0.21	3.17	2.24	6.66	1 : 15 : 11 : 32
P	0.171	0.013	0.018	0.015	11 : 13 : 1.2 : 1

Содержание органических форм азота, в основном, превышает содержание минеральных форм азота.

В воде ТО концентрации биогенных соединений – аммонийного азота (0.04–0.19 г/м³), нитритного азота (0.003–0.012 г/м³), нитратного азота (0.22–0.37 г/м³), минерального фосфора (0.003–0.025 г/м³) в последние годы, как правило, сохраняют стабильность. Концентрация органики по их интегральному показателю – химическому потреблению кислорода (ХПК) – незначительна – 3–7 г/м³ с увеличением в весеннее половодье до 9–13 г/м³. Биохимическое потребление кислорода (БПК), как индикатор уровня присутствия органических веществ, как правило, не превышает существующих эколого-гигиенических норм. Насыщение озерной воды кислородом в среднем по году – 87%. В летне-осенний период иногда бывает перенасыщение до 101–112%. Кислородный режим ТО – достаточно устойчив как в литорали (содержание растворенного в воде O₂ бывает от 9.1 до 13.7 г/м³), так и в пелагиали, соответственно, от 7.9 до 11.4 г/м³. Концентрация кислорода в основном притоке Чулышман и истоке р. Бия стабильно изменяется в пределах от 5.4 до 13.6 г/м³, а также в истоке р. Бия – от 5.5 до 12.5 г/м³, соответственно.

Анализ химических показателей в воде ТО выявил неоднородное распределение с признаками латеральных особенностей. Доминирующая тенденция здесь – в уменьшении содержания большинства гидрохимических индикаторов при переносе вод от южной части ТО на север, что может определяться влиянием

химического стока р. Чулышман [Отчет..., 1989]. Динамика основных видов загрязнения озера, поступающего с прибрежной зоны ТО – аналогичная. Поэтому повышенные концентрации большинства поллютантов (кроме нитритов) отмечаются в литорали.

На основе анализа пространственно-временного распределения показателей химического состава воды в ТО сделаны следующие выводы [Шевченко, 2010]:

- постепенное изменение по длине ТО уровня присутствия в воде большинства компонентов можно рассматривать как латеральную продольную гидрогеохимическую зональность ТО, обусловленную изменением объема поступающего речного стока и сменой комплекса природных условий;

- эта латеральная гидрогеохимическая зональность проявлена как для поверхностных, так и для глубинных слоев ТО, что косвенно указывает на наличие подводных стратифицированных течений в направлении юг-север;

- установленные гидрогеохимические особенности воды ТО свидетельствуют о превалирующей роли жидкого речного стока в формировании химического состава приповерхностного слоя воды, особенно в южной части ТО, где отчетливо проявлено влияние основного притока – р. Чулышман;

- для ТО характерна также поперечная зональность, проявленная повышенными (пониженными) значениями показателей химического состава воды в осевой зоне субширотного плеса и промежуточными значениями на меридиональном отрезке.

Приведенное выше не противоречит

результатам последующих исследований [Долматова, 2011; Третьякова, 2012; Акулова и др., 2019; Akulova, Vukatyi, 2020]. Это позволяет утверждать, что химический состав воды озера зависит пока, главным образом, от качества вод поверхностного стока. Антропогенный фактор оценивается пока как менее важный. Надо отметить, что химический состав речных вод формируется, как правило, под воздействием атмосферных осадков и, в некоторой степени, за счет подземных вод.

Существенно то, что химический состав озерной воды формируется не только механическим смешением различных природных потоков (с осадками, поверхностных, подземных), но и дальнейшей их трансформацией в ТО. Имеющиеся данные указывают на доминирующую роль смешения различных по генезису природных вод над процессами их метаморфизма при формировании химического состава озерной воды. Этому способствует активный водообмен в озере, низкая температура воды, относительно невысокие концентрации минеральных и органических веществ

и пр. [Селегей, 2009]. Однако, процессы трансформации химического состава воды в ТО, тем не менее, имеют место и также вносят существенный вклад в картину изменчивости биогенных соединений.

К загрязнителям поверхностных вод ТО, как уже отмечалось, относятся минеральные соединения азота (нитриты, нитраты, аммоний), источниками которых являются расположенные в прибрежной зоне населенные пункты, базы отдыха и стоянки туристов. Уровень содержания минерального азота в 1985–2003 гг. и в последние годы в воде ТО остался на прежнем уровне, однако в воде притоков концентрации увеличились на 15–85% (табл. 3). Содержание в воде озера аммония в последние годы в отдельные моменты достигало 3 ПДК, в воде притоков было еще выше, до 7–8 ПДК. Максимальные концентрации нитрит-иона эпизодически достигали в озерной воде – 3–3.4 ПДК, нитрат-иона – 5–10 единиц местного фона. Тем не менее, среднегодовое содержание минеральных форм азота пока заметно ниже ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Таблица 3

Содержание минеральных форм азота в воде ТО и его притоков (г/м³) [Шевченко, 2010]

Table 3

The content of mineral forms of nitrogen in the water of Lake Teletskoye and its tributaries (g/m³) [Shevchenko, 2010]

Источник данных	Озерная вода (min-max/среднее)			Речная вода (min-max/среднее)		
	Аммоний	Нитриты	Нитраты	Аммоний	Нитриты	Нитраты
ГСН (1985–2003 гг.)	$\leq 0.05-0.82$ 0.19	$\leq 0.002-0.21$ 0.016	$\leq 0.01-5.05$ 0.95	$\leq 0.05-5.66$ 0.22	$\leq 0.002-1.15$ 0.021	$\leq 0.01-15.23$ 1.37
АРИ «Экология» (2004–2009 гг.)	$\leq 0.05-1.53$ 0.19	$\leq 0.002-0.24$ 0.014	$\leq 0.01-5.71$ 1.19	$\leq 0.05-3.83$ 0.41	$\leq 0.002-0.27$ 0.035	$\leq 0.01-15.30$ 1.58

В качестве основы моделирования биогенных циклов может быть использован набор гидрохимической информации, составленный на основе мониторинговых данных Государственной системы наблюдений Росгидромета, усредненных по месяцам.

Несмотря на, казалось бы, относительно малое химическое загрязнение, вода ТО и большинства его притоков относится в соответствии с положениями Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф.Эрисмана к категории «минимально необходимая вода», т.е. не совсем оптимальна для человека. Это связано, в первую очередь, с микроэлементным составом озерной воды, в которой очень низкие концентрации таких жизненно важных элементов как фтор, йод, селен, хром и пр.

В заключение следует указать, что по имеющимся нормативным документам вода ТО относится к категории чистых и слабо загрязненных ультрапресных мягких вод с нейтральной реакцией среды. В большинстве случаев вода ТО удовлетворяет требованиям действующих санитарно-гигиенических нормативов — [Вода..., 1997] (вода питьевая) и [Санитарно-эпидемиологические..., 2002], а также нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения.

Гидробиологические условия

Гидробиологические показатели — существенны для оценки экологического состояния вод, например, в [Митрофанова, 2000; Олигер, 1982]. По упомянутым показателям воду ТО, в основном, относят к I–II классам качества по унифицированной

шестибалльной шкале [Охрана..., 1982] — «очень чистая — чистая».

В составе озерного фитопланктона на текущий момент насчитывается более трехсот видов водорослей, среди которых преобладают диатомовые, золотистые, криптофитовые, в меньшей степени, цианобактерии и зеленые водоросли. Численность и биомасса водорослей варьируются в больших пределах — 1.3–513.8 тыс. кл./л и 0.5–1207.5 мг/м³ соответственно. Среднегодовая численность фитопланктона составляет 14–57 тыс. кл./л, биомасса — 9–44 мг/м³. По этим показателям ТО сравнимо с Байкалом в его малопродуктивные годы [Митрофанова, 2000].

Большая часть водорослей по вертикали сечений ТО сосредоточена на глубинах 0.5–10 м. Их распределение по площади и во времени — неравномерно, при этом существенных различий между широтной и меридиональной зонами ТО — не отмечено. Распределение видов фитопланктона по площади ТО — неоднородно. Биомасса фитопланктона меняется в широких пределах: от 0.08 до 424.6 г/м³. На динамику этой характеристики влияют гидрологические факторы, в том числе связанные с частыми колебаниями уровня воды. По содержанию в поверхностном слое основного фотосинтетического пигмента — хлорофилла «а» в летний период Телецкое озеро сравнимо с другими глубокими озерами мира, но горизонтальное распределение хлорофилла «а» в алтайском водоеме более однородно. Вертикальное распределение основного фотосинтетического пигмента

характеризуется его преобладанием в поверхностном слое (до глубины 10 м) с постепенным снижением до 0.1 мг/м³ на глубине. Оценки средневзвешенного за теплый период содержания хлорофилла «а» (0.3–0.5 мг/м³) позволило в работе [Отчет..., 1989] отнести ТО к типу ультраолиготрофных водоемов. Следует отметить также неблагоприятные для жизнедеятельности растений условия ТО: малая (около 4%) площадь литоральной зоны, набор грунтов, характерных для скалистых территорий, низкое содержание питательных веществ.

Перечень видов зоопланктона ТО содержит около 125 видов. Из них наибольшее количество относятся к группам Cladocera (47 видов), Rotatoria (45) и Copepoda (33 вида). В теплое время года число видов и обилие зоопланктона увеличиваются. Его таксономический список свидетельствует о преобладающих олигосапробных условиях.

Как уже говорилось, в ТО отмечают неблагоприятные условия для жизнедеятельности гидробионтов: незначительное количество биогенного материала в озерной воде, низкие температуры, продолжительные интенсивные процессы перемешивания вод. Эти неблагоприятные для накопления фито- и зоопланктона в верхних наиболее прогретых слоях (до 40 м) условия определяют низкую рыбопродуктивность ТО. В XIX–XX веках максимальные годовые уловы для ТО составляли 0.4–0.7 кг на 1 га акватории, что почти на порядок ниже, чем для Байкала и на два порядка – чем для водоемов поймы

реки Обь [Селегей, 2009].

В [Олигер, 1982; Зуйкова, 1998; Зуйкова и др., 2009; Бурмистрова, 2009] приведены результаты изучения пространственно-временного распределения фитопланктона и зоопланктона в ТО. В связи с задачами моделирования также следует упомянуть и другие исследования состояния сообществ гидробионтов в ТО [Ковешников, 2009; Митрофанова, Воробьев, 2018; Митрофанова, 2018; Mitrofanova, 2019; Кириллова, 2006; Кириллова, 2008].

Жизнедеятельность бактериопланктона ТО изучена явно недостаточно. Следует отметить использование бактерий *Photobacterium phosphoreum* при биотестировании озерной воды в качестве тест-объектов [Методы..., 1989]. Установлено, что вода ТО не оказывает острого токсического действия на тест-объекты. Оценка биолюминесцентным методом качества воды свидетельствовала о незначительном ухудшении последнего в черте населенных пунктов [Тушкова и др., 1992].

О трофическом статусе Телецкого озера

Принято считать, что по состоянию с начала XX века – по сегодняшний день, на протяжении большей части года, трофический статус ТО является олиготрофным (например, [Митрофанова, 2018; Mitrofanova, 2019]). Вместе с тем нужно отметить результаты И.А. Суторихина и И.М. Фроленкова, проводивших гидрооптические измерения в конце июля 2016 г., в фазе полного летнего прогрева воды, и выполнивших оценку трофического статуса ТО на

разных участках и на разных глубинах [Суторихин, Фроленков, 2017]. Для исследований был использован вычисляемый спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, который учитывает содержание в воде как взвешенных, так и растворенных веществ (хлорофилл, растворенные органические и неорганические соединения, минеральная и органическая взвесь).

В большинстве случаев по наблюдениям в створах с. Артыбаш, п. Яйлю, рек Чулышман, Челюш, Кокши, Б. Корбу, в Камгинском заливе (рис., табл. 4–5) трофический статус озера оценен как эвтрофный [Суторихин, Фроленков, 2017]. Найти подтверждение этим результатам в исследованиях, выполненных традиционными гидрохимическими или гидробиологическими методами, пока не удалось. С помощью созданной модели

циклов биогенных элементов в озере может быть оценен трофический статус ТО в разное время года, в том числе в период максимального прогрева, равно как и биогенный баланс озера и его акваторий.

Выводы

1. Химический состав воды озера зависит пока, главным образом, от качества вод поверхностного стока; в меньшей степени – от антропогенного воздействия;
2. На основе проведенного анализа исходной информации будет создана и откалибрована точечная модель циклов азота и фосфора в озере;
3. Приложениями создаваемой модели станут предварительная оценка биогенного баланса озера, а также оценка трофического статуса озера в разное время года, в том числе в момент максимального прогрева.

Таблица 4
Расположение мест отбора проб на оз. Телецкое в июле 2016 г [Суторихин, Фроленков, 2017]
Table 4

Location of sampling sites on Lake Teletskoye in July 2016 [Sutorihin, Frolenkov, 2017]

№ места на карте	Координаты места отбора проб		Название места отбора проб
	Широта	Долгота	
1	51.35752	87.82310	Чири
2	51.35190	87.84324	Кыга
3	51.37797	87.78595	Чулышман
4	51.48432	87.72960	Челюш
5	51.57246	87.68117	Кокши
6	51.56671	87.66769	Кокши
7	51.70365	87.66107	Корбу
8	51.76655	87.63532	Окпорок
9	51.75791	87.66034	Камга
10	51.79655	87.71394	Камга
11	51.75398	87.60415	Яйлю
12	51.80928	87.30256	Окпорок-Артыбаш
13	51.78798	87.30163	Артыбаш
14	51.67214	87.68828	Аданьш
15	51.53638	87.69930	Саратки
16	51.45815	87.74204	Артал
18	51.75597	87.40980	Байказан
19	51.75078	87.55366	Нянсочь
20	51.75965	87.37575	Караташ



Рис. Расположение мест отбора проб на оз. Телецкое в июле 2016 г [Суторихин, Фроленков, 2017]

Fig. Location of sampling sites on Lake Teletskoye in July 2016 [Sutorihin, Frolenkov, 2017]

Таблица 5

Трофический статус ТО (по спектральному показателю ослабления света)
[Суторихин, Фроленков, 2017]

Table 5

Trophic status of Lake Teletskoye (according to the spectral indicator of light attenuation)
[Sutorihin, Frolenkov, 2017]

Трофический статус	Глубина, м	(ϵ , m^{-1} 430 нм)	Трофический статус
Кыгинский залив	0	1.51	олиготрофный
р. Челюш	0	2.12	мезотрофный
	10	5.23	эвтрофный
	50	8.99	эвтрофный
	100	4.81	эвтрофный
	200	10.31	эвтрофный
р. Кокши	0	2.12	мезотрофный
	10	2.63	мезотрофный
	50	5.98	эвтрофный
	100	4.40	эвтрофный
	200	5.13	эвтрофный
р. Б. Корбу	0	4.18	эвтрофный
	10	2.84	эвтрофный
	50	4.40	эвтрофный
	100	4.19	эвтрофный
	200	2.33	мезотрофный
	300	3.98	эвтрофный
Камгинский залив	0	4.71	эвтрофный
	10	1.61	олиготрофный
	50	4.29	эвтрофный
	100	3.35	эвтрофный
п. Яйлю	0	2.32	мезотрофный
	10	4.50	эвтрофный
	50	4.18	эвтрофный
	100	5.23	эвтрофный
	200	4.30	эвтрофный
с. Артыбаш	0	4.49	эвтрофный
	10	4.08	эвтрофный
Чульшман	0	5.23	эвтрофный

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declares that he has no conflict of interest.

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

Список литературы

Акулова О.Б., Букатый В.И., Марусин К.В. Пространственная изменчивость гидрооптических характеристик Телецкого озера // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019. № 3. С. 16–27. doi: 10.17076/lim947

Афанасьев Е.С. Стратифицированные течения, их взаимодействие и перенос примесей в водохранилищах и озерах: Дисс... кандидата физико-математ. наук. Москва, 2006. 130 с.

Бочаров О.Б., Васильев О.Ф., Квон В.И., Овчинникова Т.Э. Численное исследование гидротермических процессов и процессов переноса в глубоких водоемах // Сибирский экологический журнал. 2003. Т. 10, № 2. С. 221–230.

Бурмистрова О.С. Зоопланктон разнотипных водных экосистем бассейна Верхней Оби: Дисс... кандидата биологических наук. Новосибирск, 2009. 235 с.

Васильев О.Ф., Кириллов В.В., Клеркс Я., Селегей В.В. Комплексные исследования экосистемы Телецкого озера // Гидрологические и экологические процессы в водоемах и их водосборных бассейнах: Материалы Международного симпозиума (26–28 сентября 1995 г., Новосибирск). Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 1996. С. 120–122.

Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. ГОСТ 2874-82. Издание официальное. Москва: ИПК издание стандартов. 1997. 10 с.

Данчев В.Н. Разработка и применение информационно-вычислительного комплекса для моделирования циркуляций и термического режима Телецкого озера: Дисс... кандидата технических наук. Новосибирск, 2013. 160 с.

Долматова Л.А. Особенности гидрохимического режима Телецкого озера в период осеннего охлаждения // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 6–2(31). С. 417–423.

Дучков А.Д., Клерке Ж., Казанцев С.А. Тепловой поток Телецкого озера // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 10. С. 143–153.

Зиновьев А.Т., Кириллов В.В., Марусин К.В. Кислородный режим Телецкого озера: моделирование и натурные данные // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы научной конференции (20–24 сентября 2005 г., Иркутск). Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2005. С. 416–418.

Зиновьев А.Т. Моделирование температурной стратификации Телецкого озера //

Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири: сборник статей. Новосибирск: Институт археологии и этнографии СО РАН, 2002. Вып. 1. С. 212–216.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Температурный режим Телецкого озера: моделирование и эксперимент // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 6–2(25). С. 285–289.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Численное моделирование и натурные исследования термобара в Телецком озере // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 86–94. doi:10.52002/0130-2906-2021-5-86-94

Зиновьев А.Т., Митрофанова Е.Ю., Третьякова Е.И. [и др.] Комплексные исследования Телецкого озера: термический режим, гидрохимические и гидробиологические характеристики // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летию юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН (20–24 августа 2012 г., Барнаул). Барнаул, 2012. Том 1. С. 43–47.

Зуйкова Е.И., Шевелева Н.Г., Евстигнеева Т.Д. Сезонная и межгодовая динамика зоопланктона Телецкого озера // Биология внутренних вод. 2009. № 3. С. 47–60.

Зуйкова Е.И. Современное состояние зоопланктонного сообщества Телецкого озера: Дисс... кандидата биол. наук. Красноярск, 1998. 124 с.

Квон Д.В. Математическое моделирование гидротермических процессов в Телецком озере: Дисс... кандидата физико-математ. наук. Барнаул, 1998. 136 с.

Квон Д.В., Квон В.И., Филатова Т.Н. Численное моделирование гидротермических процессов в предустьевой области Телецкого озера // Вычислительные технологии. 2000а. Т. 5, № 5. С. 68–77.

Квон Д.В., Квон В.И., Семчуков А.Н. Численный расчет продольно-вертикальной термической структуры Телецкого озера в годовом цикле // Вычислительные технологии. 2000б. Т. 5, № 3. С. 29–45.

Кириллова Т.В. Пигментные характеристики фитопланктона Телецкого озера: Дисс... кандидата биол. наук. Красноярск, 2006. 220 с.

Кириллова Т.В. Вертикальное распределение и межгодовая динамика пигментных характеристик фитопланктона Телецкого озера // Мир науки, культуры, образования. 2008. № 1(8). С. 4–8.

Ковешников М.И. Пространственное распределение, сезонная динамика зообентоса и оценка экологического состояния водных объектов бассейна реки Бия: Дисс... кандидата биологических наук. Барнаул, 2009. 275 с.

Методы биоиндикации и биотестирования природных вод. Вып. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 276 с.

Митрофанова Е.Ю., Воробьев Р.И. Состав и структура фитопланктона Телецкого озера (Республика Алтай) в период зимнего минимума // Проблемы ботаники Южной

Сибири и Монголии. 2018. № 17. С. 103–106.

Митрофанова Е. Ю. Фитопланктон Телецкого озера (Алтай, Россия): особенности развития и многолетней динамики // *Экология*. 2018. № 2. С. 146–151. doi: 10.7868/S0367059718020087

Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера: Дисс... кандидата биол. наук. Москва, 2000. 200 с.

Олигер Т.А. Гидрохимия вод террас Телецкого озера // *Эволюция речных систем Алтайского края и вопросы практики*. Барнаул: 1982. С. 46–48.

Отчет о НИР «Гидрохимическая характеристика Телецкого озера» / Науч. руков. Г.М. Шпейзер. Иркутск: ИГУ, 1989. 50 с.

Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. ГОСТ 17.1.3.07-82. Издание официальное. Государственный комитет СССР по стандартам от 19.03.1982. 1982. 10 с.

Природа многолетних колебаний речного стока / Ред. И.П. Дружинин. Новосибирск: Наука, 1967. 153 с.

Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Зиновьев А.Т. [и др.] Комплексные экологические исследования Телецкого озера в 2018 г // *Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике*. 2019. № 1. С. 68–75.

Пушистов П.Ю., Викторов Е.В. Прикладной системный анализ циркуляций и термического режима Телецкого озера. Барнаул: ООО «Пять плюс», 2016. 152 с.

Рачкин Д.А. Водный баланс Телецкого озера: Выпускная квал. работа / Рук. Барышников Н.Б. Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2018. 77 с.

Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.4.1116-02. (с изменениями от 25 февраля 2010 г., 28 июня 2010 г.). Москва. 2002. 17 с.

Селегей, В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 143 с.

Селегей В.В. Телецкое озеро. Очерки истории. В трех книгах. Книга первая. Новосибирск: Офсет, 2009. 119 с.

Суторихин И.А., Фроленков И.М. Оценка трофического статуса Телецкого озера по данным гидрооптических измерений в видимом диапазоне // *Известия Алтайского государственного университета*. 2017. № 4(96). С. 67–71. doi: 10.14258/izvasu(2017)4-11

Третьякова Е.И. Пространственное распределение биогенных элементов в водах Телецкого озера // *Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летию юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН (20–24 августа 2012 г., Барнаул)*. Барнаул, 2012. Том 2. С. 190–194.

Тушкова Г.И., Папина Т.С., Романова Н.В., Кириллова Т.В. Анализ качества воды Телецкого озера и водотоков бассейна р. Катунь методами биотестирования // *Состояние, освоение и проблемы экологии ландшафтов Алтая. Матер, науч.-практ. конф. Ч. 1. Горно-*

Алтайск: 1992. С. 99–100.

Шевченко Г.А. Геоэкологическое состояние акватории и прибрежной зоны Телецкого озера (Горный Алтай): Дисс... кандидата геолого-минерал. наук. Томск, 2010. 149 с.

Akulova O.B., Bukatyi V.I. Evaluation of suspended matter effect on spectral light attenuation in Lake Teletskoye (Translated by E. S. Kochetkova) // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020. Vol. 13, no. 1. P. 35-44. doi: 10.7868/S2073667320010049

Koshelev K., Zinoviev A., De Goede E., De Graaff R. Modelling of Thermal Stratification and Ice Dynamics with Application to Lake Teletskoye, Altai Republic, Russia // *Water Resources*. 2021. Vol. 48, no. 3. P. 368–377. doi: 10.1134/S0097807821030088

Mitrofanova E. Yu. Integral assessment of stability for deep oligotrophic reservoir ecosystem (Lake Teletskoye, Altai as a case study) // *Lakes of Eurasia: Problems and Solutions: Proceeding II international conf. (19–24 may 2019 г., Kazan)*. Part 1. Kazan: Academy of sciences of the Republic of Tatarstan, 2019. P. 121–125.

Zinoviev A.T. Simulation of ice-thermal regime of Lake Teletskoye // *International Symposium «Hydrological and ecological processes in the reservoirs and their watersheds»: Proceedings*. Novosibirsk: IWEP, SB RAS Publ., 1994.

References

Akulova O.B., Bukatyj V.I., Marusin K.V. Prostranstvennaja izmenchivost' gidroopticheskikh karakteristik Teleckogo ozera [Spatial variability of hydro-optical characteristics of Lake Teletskoye] // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. 2019. № 3. P. 16–27. doi: 10.17076/lim947. (in Russian).

Afanas'ev E.S. Stratificirovannye techenija, ih vzaimodejstvie i perenos primesej v vodohranilishhah i ozerah [Stratified currents, their interaction and transport of impurities in reservoirs and lakes]. Summary of PhD (Cand. of Physic. and Mathem.) thesis. Moskva, 2006. 130 p. (in Russian).

Bocharov O.B., Vasil'ev O.F., Kvon V.I., Ovchinnikova T. Je. Chislennoe issledovanie gidrotermicheskikh processov i processov perenosa v glubokih vodoemah [Numerical study of hydrothermal processes and transport processes in deep reservoirs] // *Sibirskij jekologicheskij zhurnal [Siberian Ecological Journal]*. 2003. Vol. 10, no 2. P. 221–230. (in Russian).

Burmistrova O.S. Zooplankton raznotipnyh vodnyh jekosistem bassejna Verhnej Obi [Zooplankton of diverse aquatic ecosystems of the Upper Ob basin]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Novosibirsk, 2009. 235 p. (in Russian).

Vasil'ev O.F., Kirillov V.V., Klerks Ja., Selegej V.V. Kompleksnye issledovanija jekosistemy Teleckogo ozera [Comprehensive studies of the ecosystem of Lake Teletskoye] // *Gidrologicheskie i jekologicheskie processy v vodoemah i ih vodosbornyh bassejnah: Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma (26–28 sent. 1995 g.)*. [Hydrological and ecological processes in reservoirs and their catchment basins: Proceedings of the International Symposium (Sept.

26–28, 1995)]. Novosibirsk: Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 1996. P. 120–122. (in Russian).

Voda pit'evaja. Gigienicheskie trebovanija i kontrol' za kachestvom [Drinking water. Hygienic requirements and quality control]. GOST 2874-82. Izdanie oficial'noe. Moskva: IPK izdanie standartov. 1997. 10 p.

Danchev V.N. Razrabotka i primenenie informacionno-vychislitel'nogo kompleksa dlja modelirovanija cirkuljacij i termicheskogo rezhima Teleckogo ozera [Development and application of an information and computing complex for simulation of circulation and thermal regime of Lake Teletskoye]: Summary of PhD (Cand. of Tehnic.) thesis. Novosibirsk, 2013. 160 p. (in Russian).

Dolmatova L.A. Osobennosti gidrohimicheskogo rezhima Teleckogo ozera v period osennego ohlazhdenija [Features of the hydrochemical regime of Lake Teletskoye during the autumn cooling] // *Mir nauki, kul'tury, obrazovanija* [The world of science, culture, education]. 2011. No 6–2(31). P. 417–423. (in Russian).

Duchkov A.D., Klerke Zh., Kazancev S.A. Teplovoj potok Teleckogo ozera [Heat flow of Lake Teletskoye] // *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics]. 1995. Vol. 36, no 10. P. 143–153 (in Russian).

Zinov'ev A.T., Kirillov V.V., Marusin K.V. Kislorodnyj rezhim Teleckogo ozera: modelirovanie i naturnye dannye [Oxygen regime of Lake Teletskoye: modeling and field data] // *Fundamental'nye problemy izuchenija i ispol'zovanija vody i vodnyh resursov: Materialy nauchnoj konferencii (20–24 Sept. 2005 g.)* [Fundamental problems of Studying and Using water and Water Resources: Materials of a scientific conference (Sept. 20–24, 2005)]. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2005. P. 416–418. (in Russian).

Zinov'ev A.T. Modelirovanie temperaturnoj stratifikacii Teleckogo ozera [Modeling of temperature stratification of Lake Teletskoye] // *Osnovnye zakonomernosti global'nyh i regional'nyh izmenenij klimata i prirodnoj sredy v pozdnem kajnozoe Sibiri* [The main patterns of global and regional climate and environmental changes in the Late Cenozoic of Siberia: collection of articles]. Novosibirsk: Institute of Archeology and Ethnography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. P. 212–216. (in Russian).

Zinov'ev A.T., Koshelev K.B., Marusin K.V. Temperaturnyj rezhim Teleckogo ozera: modelirovanie i jeksperiment [Temperature regime of Lake Teletskoye: modeling and experiment] // *Mir nauki, kul'tury, obrazovanija* [The world of science, culture, education]. 2010. No. 6–2(25). P. 285–289. (in Russian).

Zinov'ev A.T., Koshelev K.B., D'jachenko A.V., Marusin K.V. Chislennoe modelirovanie i naturnye issledovanija termobara v Teleckom ozere [Numerical modeling and field studies of a thermal tank in Lake Teletskoye] // *Meteorologija i gidrologija* [Meteorology and hydrology]. 2021. No. 5. P. 86–94. doi:10.52002/0130-2906-2021-5-86-94. (in Russian).

Zinov'ev A.T., Mitrofanova E.Ju., Tret'jakova E.I. [et al.] Kompleksnyje issledovanija

Teleckogo ozera: termicheskij rezhim, gidrohimicheskie i gidrobiologicheskie karakteristiki [Comprehensive studies of Lake Teletskoye: thermal regime, hydrochemical and hydrobiological characteristics] // *Vodnye i jekologicheskie problemy Sibiri i Central'noj Azii: trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 25-letnemu jubileju Instituta vodnyh i jekologicheskikh problem SO RAN (20–24 avgusta, 2012 g.)* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation dedicated to the 25th anniversary of the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS (August 20–24, 2012). Barnaul, 2012. P. 43–47. (in Russian).

Zujkova E.I. *Sovremennoe sostojanie zooplaktonnogo soobshhestva Teleckogo ozera* [The current state of the zooplankton community of Lake Teletskoye]: PhD (Cand. of Biol.). Krasnojarsk, 1998. 124 p. (in Russian).

Zujkova E.I., Sheveleva N.G., Evstigneeva T.D. *Sezonnaja i mezhgodovaja dinamika zooplaktona Teleckogo ozera* [Seasonal and interannual dynamics of zooplankton of Lake Teletskoye] // *Biologija vnutrennih vod* [Biology of inland waters]. 2009. No. 3. P. 47–60. (in Russian).

Kvon D.V. *Matematicheskoe modelirovanie gidrotermicheskikh processov v Teleckom ozere* [Mathematical modeling of hydrothermal processes in Lake Teletskoye]. PhD (Cand. of Physics and mathemat.). Barnaul, 1998. 136 p. (in Russian).

Kvon D.V., Kvon V.I., Filatova T.N. *Chislennoe modelirovanie gidrotermicheskikh processov v predust'evoj oblasti Teleckogo ozera* [Numerical modeling of hydrothermal processes in the pre-estuary region of Lake Teletskoye] // *Vychislitel'nye tehnologii* [Computing technologies]. 2000a. Vol. 5, no. 5. P. 68–77 (in Russian).

Kvon D.V., Kvon V.I., Semchukov A.N. *Chislennyj raschet prodol'no-vertikal'noj termicheskoj struktury Teleckogo ozera v godovom cikle* [Numerical calculation of the longitudinal-vertical thermal structure of Lake Teletskoye in the annual cycle] // *Vychislitel'nye tehnologii* [Computing technologies]. 2000b. Vol. 5, no. 3. P. 29–45 (in Russian).

Kirillova T.V. *Pigmentnye karakteristiki fitoplaktona Teleckogo ozera* [Pigment characteristics of phytoplankton of Lake Teletskoye]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Krasnojarsk, 2006. 220 p. (in Russian).

Kirillova T.V. *Vertikal'noe raspredelenie i mezhgodovaja dinamika pigmentnyh karakteristik fitoplaktona Teleckogo ozera* [Vertical distribution and interannual dynamics of pigment characteristics of phytoplankton of Lake Teletskoye] // *Mir nauki, kul'tury, obrazovanija* [The world of science, culture, education]. 2008. № 1(8). P. 4–8. (in Russian).

Koveshnikov M.I. *Prostranstvennoe raspredelenie, sezonnaja dinamika zoobentosa i ocenka jekologicheskogo sostojanija vodnyh obektov bassejna reki Bija* [Spatial distribution, seasonal dynamics of zoobenthos and assessment of the ecological status of water bodies in the Biya River basin]: PhD (Cand. of Biol.). Barnaul, 2009. 275 p. (in Russian).

Metody bioindikacii i biotestirovanija prirodnyh vod. [Methods of bioindication and biotesting of natural waters]. Vol. 2. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 276 p. (in Russian).

Mitrofanova E.Ju., Vorob'ev R.I. Sostav i struktura fitoplanktona Teleckogo ozera (Respublika Altaj) v period zimnego minimuma [Composition and structure of phytoplankton of Lake Teletskoye (Altai Republic) during the winter minimum] // Problemy botaniki Juzhnoj Sibiri i Mongolii [Ecology problems of botany in Southern Siberia and Mongolia]. 2018. No. 17. P. 103–106 (in Russian).

Mitrofanova E.Ju. Fitoplankton Teleckogo ozera (Altaj, Rossija): osobennosti razvitija i mnogoletnej dinamiki [Phytoplankton of Lake Teletskoye (Altai, Russia): features of development and long-term dynamics] // Jekologija [Ecology]. 2018. No. 2. P. 146–151. doi:10.7868/S0367059718020087. (in Russian).

Mitrofanova E.Ju. Fitoplankton Teleckogo ozera [Phytoplankton of Lake Teletskoye]: PhD (Cand. of Biol.). Moscow, 2000. 200 p. (in Russian).

Oliger T.A. Gidrohimiya vod terras Teleckogo ozera [Hydrochemistry of the waters of the terraces of Lake Teletskoye] // Jevoljucija rechnyh sistem Altajskogo kraja i voprosy praktiki [Evolution of river systems of the Altai Territory and practical issues]. Barnaul: 1982. P. 46–48. (in Russian).

Otchet o NIR "Gidrohimicheskaja harakteristika Teleckogo ozera" [Hydrochemical characteristics of Lake Teletskoye] / Nauch. rukov. G.M. Shejzer. Irkutsk: IGU, 1989. 50 p. (in Russian).

Ohrana prirody. Gidrosfera. Pravila kontrolja kachestva vody vodoemov i vodotokov [Nature protection. Hydrosphere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows]. GOST 17.1.3.07-82. Izdanie oficial'noe. Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam ot 19.03.1982. 1982. 10 p. (in Russian).

Priroda mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka [The nature of long-term fluctuations in river flow] / Ed. I.P. Druzhinina. Novosibirsk: Nauka, 1967. 153 p. (in Russian).

Puzanov A.V., Bezmaternyh D.M., Zinov'ev A.T. [et al.] Kompleksnye jekologicheskie issledovanija Teleckogo ozera v 2018 g [Comprehensive ecological studies of Lake Teletskoye in 2018] // Polevye issledovanija v Altajskom biosfernom zapovednike [Field research in the Altai Biosphere Reserve]. 2019. No. 1. P. 68–75. (in Russian).

Pushistov P.Ju., Viktorov E.V. Prikladnoj sistemnyj analiz cirkuljacij i termicheskogo rezhima Teleckogo ozera [Applied system analysis of circulation and thermal regime of Lake Teletskoye]. Barnaul: OOO «Pjat' pljus», 2016. 152 p. (in Russian).

Rachkin D.A. Vodnyj balans Teleckogo ozera [Water balance of Lake Teletskoye]: Graduate qualification paper / Sc. sup. Baryshnikov N.B. Sankt Peterburg: Rossijskij gosudarstvennyj gidrometeorologičeskij universitet. 2018. 77 p. (in Russian).

Sanitarno-jepidemiologičeskie pravila i normativy [Sanitary and epidemiological rules and regulations]. SanPiN 2.1.4.1116-02. (s izmenenijami ot 25 fevralja 2010 g., 28 ijunja 2010 g.). Moskva. 2002. 17 p.

Selegej V.V., Selegej T.S. Teleckoe ozero [Teletskoye Lake]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 143 p. (in Russian).

Selegej V.V. Teleckoe ozero. Ocherki istorii [Teletskoye Lake. Essays of history]. Vol. 1. Novosibirsk: Ofset, 2009. 119 p. (in Russian).

Sutorihin I.A., Frolenkov I.M. Ocenka troficheskogo statusa Teleckogo ozera po dannym gidroopticheskikh izmerenij v vidimom diapazone [Assessment of the trophic status of Lake Teletskoye according to hydro-optical measurements in the visible range] // *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Altai State University]. 2017. No. 4(96). P. 67–71. doi: 10.14258/izvasu(2017)4-11. (in Russian).

Tret'jakova E.I. Prostranstvennoe raspredelenie biogennyh jelementov v vodah Teleckogo ozera [Spatial distribution of biogenic elements in the waters of Lake Teletskoye]. *Vodnye i jekologicheskie problemy Sibiri i Central'noj Azii: trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 25-letnemu jubileju Instituta vodnyh i jekologicheskikh problem SO RAN (20–24 avgusta, 2012 g.)* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation dedicated to the 25th anniversary of the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS (August 20–24, 2012)]. Barnaul, 2012. P. 190–194. (in Russian).

Tushkova G.I., Papina T.S., Romanova N.V., Kirillova T.V. Analiz kachestva vody Teleckogo ozera i vodotokov bassejna r. Katun' metodami biotestirovanija [Analysis of the water quality of Lake Teletskoye and the watercourses of the Katun River basin by biotesting methods] // *Sostojanie, osvoenie i problemy jekologii landshaftov Altaja. Mater, nauch.-prakt. konf. Ch. 1.* [The state, development and problems of ecology of Altai landscapes. Mater, scientific and practical conf. Part 1]. Gorno-Altajsk. 1992. P. 99–100. (in Russian).

Shevchenko G.A. Geojekologicheskoe sostojanie akvatorii i pribrezhnoj zony Teleckogo ozera (Gornyj Altaj): [Geoecological condition of the water area and coastal zone of Lake Teletskoye (Gornyj Altai)]. PhD (Cand. of Geological and mineralogi.). Tomsk, 2010. 149 p. (in Russian).

Akulova O.B., Bukatyi V.I. Evaluation of suspended matter effect on spectral light attenuation in Lake Teletskoye (Translated by E. S. Kochetkova) // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020. Vol. 13, no. 1. P. 35–44. doi: 10.7868/S2073667320010049

Koshelev K., Zinoviev A., De Goede E., De Graaff R. Modelling of Thermal Stratification and Ice Dynamics with Application to Lake Teletskoye, Altai Republic, Russia // *Water Resources*. 2021. Vol. 48, no. 3. P. 368–377. doi: 10.1134/S0097807821030088

Mitrofanova E. Yu. Integral assessment of stability for deep oligotrophic reservoir ecosystem (Lake Teletskoye, Altai as a case study) // *Lakes of Eurasia: Problems and Solutions: Proceeding II international conf. (19–24 may 2019 r., Kazan)*. Part 1. Kazan: Academy of sciences of the Republic of Tatarstan, 2019. P. 121–125.

Zinoviev A.T. Simulation of ice-thermal regime of Lake Teletskoye // *International Symposium «Hydrological and ecological processes in the reservoirs and their watersheds»: Proceedings*. Novosibirsk: IWEP, SB RAS Publ., 1994.

ON THE CONDITIONS OF BIOGENIC CYCLES IN LAKE TELETSKOYE: DATA ANALYSIS FOR MODELING

A.A. Tskhai^{1,2}, M. A. Romanov³

¹*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, E-mail: tskhai@iwep.ru*

²*Polzunov Altai State Technical University, Barnaul*

³*Altai State University, Barnaul*

The object of the study is Lake Teletskoye. The purpose of the work is to analyze of the existing source information for modeling the cycles of biogeochemical transformation for nitrogen and phosphorus compounds in the object of study. The survey study carried out in this paper can serve as a factual basis for modeling of the state for the aquatic ecosystem of Lake Teletskoye.

Keywords: Teletskoye Lake; mathematical model; limnology; meteorology; hydrology; hydrochemistry; hydrobiology; transformation; biogeochemical cycle.

Received October 24, 2023. Accepted: November 20, 2023

Сведения об авторах

Цхай Александр Андреевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-3892-1502; 0000-0003-3664-7722. E-mail: tskhai@iwep.ru.

Романов Максим Анатольевич – преподаватель колледжа ФГБОУ ВО Алтайского государственного университета. Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.

Information about the authors

Tskhai Aleksandr Andreevich – Dr Sc in Technics, Professor, Chief Researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-3892-1502; 0000-0003-3664-7722. E-mail: tskhai@iwep.ru

Romanov Maxim Anatol'evich – Lecturer of the College of the Altai State University. 61, Lenin Av., 656049 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.