

## ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

И.В. Федорова<sup>1</sup>, канд. геогр. наук, Г.Э. Здоровеннова<sup>2</sup>, канд. геогр. наук, Р.Э. Здоровеннов<sup>2</sup>, канд. геогр. наук

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

## THERMAL REGIME OF ARCTIC LAKES ON THE BACKGROUND OF CLIMATIC VARIABILITY

I.V. Fedorova<sup>1</sup>, Cand. Sc., G.E. Zdrovennova<sup>2</sup>, Cand. Sc., R.E. Zdrovennov<sup>2</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Northern water problems Institute Karelian Research Center, Petrozavodsk, Russia

*Приведены результаты натурных измерений и моделирования термического режима мелководных арктических озер, расположенных на острове Самойловский в дельте р. Лены, с использованием одномерной параметризованной математической модели Flake.*

*The results of field measurements and modeling of the thermal regime of shallow Arctic lakes located on Samoilovsky Island in the Lena River Delta are presented using the one-dimensional parameterized mathematical model Flake.*

### **Введение.**

На фоне наблюдаемого «потепления» климата происходят изменения в ландшафтах арктической зоны. При этом экосистемы небольших мелководных водоемов Арктики являются наиболее уязвимыми. Озера арктической зоны, ввиду малой термической инерции, испытывают значительные изменения в термическом и ледовом режимах и условиях перемешивания на фоне меняющегося климатического воздействия [1-3]. Наблюдаемые изменения в физических, химических и биологических аспектах экосистем водоемов также обусловлены термической эрозией вечной мерзлоты и образованием термокарста [4, 5]. Эти изменения определяют продолжительность «биологического лета», жизненные циклы гидробионтов, а также влияют на химико-биологические процессы в период ледостава, в том числе, на кислородный режим, что делает озерные экосистемы потенциально уязвимыми. Экологическая значимость подобных исследований определяется тем, что даже небольшие изменения в сроках наступления и продолжительности этапов термического цикла озер, условий перемешивания могут оказывать огромное влияние на функционирование экосистем водоемов, в частности, на планктонное сообщество [6].

Характерной чертой текущего состояния климата в Арктическом регионе является регулярное проникновение теплых и насыщенных влагой воздушных масс атлантического происхождения. На границе Арктического шельфа в зимний период формируются стационарные польны, которые оказывают существенное влияние на погоду и климат прилегающих районов, определяя режим осадков, характер облачности, радиационный баланс подстилающей поверхности, а также состояние и изменчивость снежного и ледяного покровов. Формируется «мозаичная» структура климатических состояний в различных районах Арктики, усложняющая адекватную оценку тенденции изменения климата региона в целом.

Термический и ледовый режимы озер арктической зоны определяются их географическим положением и характеризуются, главным образом, коротким (2-3.5 месяца) периодом открытой воды и большой толщиной льда, достигающей 1.5-2 м [7, 8]. Изменения регионального климата последних десятилетий оказывают заметное влияние на продолжительность ледостава на арктических озерах, изменяя, в первую очередь, даты окончания ледостава [4]. Сокращение продолжительности ледостава, и, как следствие, более длительный период испарения, приводят к уменьшению глубины озер, изменяют сроки замерзания, толщину льда и вносят, таким образом, существенные изменения в функционирование озерных экосистем [8, 9].

Исследования термического и кислородного режимов водоемов арктической зоны, продолжительности периодов аноксии и «биологического лета» необходимы для оценки условий

функционирования озерных экосистем в течение года. Выполнение подобного рода оценок для озер Арктики является до сих пор весьма актуальной задачей в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на водные экосистемы и малым количеством данных. Арктические регионы с их труднодоступностью и суровым климатом придают исследованиям озер большую сложность, а новые полученные сведения делают уникальными. Использование методов математического моделирования в этих условиях помогает решить ряд задач при исследовании экологического состояния арктических территорий.

Цель исследования – изучение и численное моделирование термического и ледового режимов малых арктических озер острова Самойловский (дельта реки Лены) на фоне изменений в региональном климате.

#### **Материалы и методы.**

В 2009-2012 гг. силами сотрудников российско-германской Лаборатория полярных и морских исследований им. Отто Юльевича Шмидта (ААНИИ), Санкт-Петербургского государственного Университета и германских коллег из Института Альфреда Вегенера, Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (AWI) в рамках экспедиции «Лена» проводились комплексные гидрофизические, палеолимнологические и химико-биологические исследования мелководных водоемов, расположенных на прибрежных территориях арктической зоны, направленные на оценку уязвимости их экосистем при возрастающем антропогенном воздействии на фоне изменяющихся климатических условий [5, 7, 10]. В рамках экспедиции были обследованы многочисленные мелководные озера, марши, лайды, устья впадающих в Северный Ледовитый океан рек, затапливаемых в период приливов и нагонов, болота и заболоченные территории. В дельте реки Лены насчитывается около 1.5 тысяч островов и 60 тысяч озер. В южной части дельты Лены исследования были сосредоточены в районе острова Самойловский (72°37 с.ш., 126°49 в.д.).

Моделирование термического режима и условий перемешивания озер проводилось с использованием одномерной параметризованной математической модели Flake (<http://nwpi.krc.karelia.ru/flake>; <http://lakemodel.net>). Длительные непрерывные измерения температуры воды проводились с использованием термокос, установленных в трех озерах острова Самойловский Molo, Fish и Ванное-2 в период с июля 2009 по август 2012 гг. Гидрологическое описание этих озер приведено в работе [7]. Анализ рядов температуры воды (3-4 термодатчика, расположенных вблизи границы вода-дно и выше через 2 м в водной толще) позволил установить основные особенности термического и ледового режимов озер, определить даты замерзания и освобождения ото льда, начала весенней подледной конвекции и осеннего охлаждения [11]. При модельных расчетах были приняты следующие допущения: для озера Molo средняя глубина 2.2 м, прозрачность 1.5 м, толщина теплоактивного слоя донных отложений 3.5 м, температура на его нижней границе 2°C; для озера Fish средняя глубина 3.1 м, прозрачность 2 м, толщина теплоактивного слоя донных отложений 4 м, температура на его нижней границе 2°C; для озера Ванное-2 средняя глубина 4.3 м, прозрачность 2.5 м, толщина теплоактивного слоя донных отложений 4 м, температура на его нижней границе 2°C.

Для оценки атмосферного воздействия при модельных расчетах использовались данные метеостанции «Столб остров» (Республика Саха, Булунский улус) (сайты "Расписание Погоды", [rp5.ru](http://rp5.ru) и «Погода и климат» <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=21721>).

#### **Результаты и обсуждение.**

*Продолжительность ледостава.* Результаты численных расчетов показали, что даты начала ледостава и его окончания заметно отличались для всех трех озер от дат, установленных по измерениям. Для озера Molo «модельный» ледостав начинался раньше сроков, установленных с помощью измерений – на неделю осенью 2009 и 2011 гг. и на двое суток в 2010 г. Модельные даты окончания ледостава происходили на 8-10 суток позже в июне 2010 и 2011 гг. и на 5 суток позже в июне 2012 г.

На озере Fish «модельный» ледостав наступал на 3-7 суток раньше, заканчивался на 5-10 суток позже.

Модельные даты начала ледостава на озере Ванное-2 в 2009 и 2011 гг. наступали на 5-8 суток раньше, чем по данным натуральных измерений, в 2010 г. – наступили позже на двое суток относительно наблюдаемой даты. Даты освобождения озера ото льда по модельным расчетам в