ИМИТАЦИЯ АДАПТАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОЗЕРА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ К БЫСТРОМУ ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

В. Ю. Третьяков, В. В. Дмитриев, И. В. Федорова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

V. Yu. Tretyakov, V. V. Dmitriev, I. V. Fedorova

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*Обсуждаются результаты оценки влияния на экосистемы арктических озёр возможного изменения климата с помощью компьютерной имитационной модели функционирования водной экосистемы*.

*There is considered influence of possible climate change at ecosystems of Arctic lakes according to results of computer simulation.*

Многие озёра Арктической зоны России имеют важное значение как акватории нереста и нагула ценных промысловых видов ихтиофауны [1]. Поэтому актуальна проблема получения адекватного прогноза результатов адаптаций озёрных экосистем к возможным изменениям климата. Исследование трёх небольших озёр на острове Самойловском в дельте реки Лены в 2009-2012 гг. [2] показали, что период ледостава на них в среднем продолжался 260 суток, их замерзание происходило с 26 сентября по 5 октября при температуре водной толщи 0.1-1.6 °С, освобождение от ледяного покрова - во второй декаде июня. Максимальные температуры наблюдались во второй половине июля, в поверхностных слоях они составляли 13.5-18.3 °С, в придонных - 12.8-17.4 °С. Как видно, летние температуры воды не очень отличаются от летних температур в прохладные годы в озёрах умеренной зоны, например, в озёрах Ленинградской области, Новгородской, Псковской областей. Основное различие заключается в большей продолжительности периода ледостава, и в гораздо меньшей продолжительности периода с относительно высокой температурой воды. Следует заметить, что диатомея мелозира исландская (Melosira islandica) широко распространена в озёрном планктоне умеренной зоны и Арктики. Она обычно присутствует в планктоне Онежского и Ладожского озёр, и реки Невы. Melosira italica также очень широко распространена в фитопланктоне озёр умеренной и арктической зон. Поэтому для моделирования функционирования экосистем арктических озёр допустимо применение имитационных моделей, разработанных для экосистем умеренной зоны.

Для ориентировочной оценки влияния на экосистемы арктических озёр возможного быстрого изменения климата были выполнены численные эксперименты на компьютерной имитационной модели функционирования водной экосистемы «Программа для моделирования антропогенного эвтрофирования и отравления токсикантами водных экосистем» (EVTOX) [3]. Модель представляет собой систему из 103 нелинейных дифференциальных уравнений, решаемую методом Рунге-Кутты. Каждое уравнение рассчитывает временную динамику одного компонента модели. Правая часть каждого уравнения представляет собой алгебраическую сумму интенсивностей отдельных процессов, вызывающих изменение концентрации абиотического или удельной биомассы биотического компонента модели. Компонентами модельного планктона являются несколько групп фито- и зоопланктона, ассоциированные с детритом бактерии. Ихтиофауна в модели представлена молодью планктоноядных рыб, хищных рыб и рыб бентофагов. Бентос модели состоит из червей олигохет и моллюсков. Абиотические компоненты модели – это планктоногенный детрит, взвешенное минеральное и органическое вещество, взвешенное вещество донного ила, растворённые органические углерод, азот, фосфор, растворённые ионы аммония, нитриты, нитраты, фосфаты, растворённые кислород и углекислый газ. Токсическими компонентами модели являются концентрации токсического загрязняющего вещества в организмах, взвешенной органике и в воде. Модель отражает накопление токсиканта в трофической цепи. Токсикант воздействует на биоценоз путём изменения жизненных процессов и увеличения смертности организмов.

Временным периодом моделирования является один календарный год, с 1 января по 31 декабря. Формализованные процессы подразделяются на: 1) транслокационные – процессы изменения значений компонентов модели из-за обмена веществом между самими компонентами; 2) изменения значений компонентов модели из-за смешивания вод самого водоёма с поступающими в него речными водами, т.е. из-за проточности водоема. В проточном варианте модели изменения значений из-за проточности отсутствуют у компонентов ихтиоценоза и бентоценоза. Модель может имитировать функционирование экосистемы непроточного водоема, в котором отсутствуют как внешний приток, так и сток из него. Пространственно модель может включать один или два слоя воды. В последнем случае модель является двухрезервуарной, в неё добавляются процессы изменения значений компонентов из-за молекулярного и турбулентного обмена между слоями и гравитационного осаждения взвешенных компонентов модели из верхнего слоя в нижний слой. Также модель позволяет имитировать функционирование экосистемы в вариантах без токсического загрязняющего вещества и с его наличием. В последнем варианте добавляются процессы изменения концентраций токсиканта в водной толще и организмах биотических компонентов модели из-за проточности водоёма и транслокационных процессов.

В однослойном варианте модели имитируются следующие процессы в водной толще: биосинтез трех групп фитопланктона, поглощение при этом из воды СО2, биогенов и выделение О2; дыхательно-выделительные процессы фито, зоо- и бактериопланктона, ихтиоценоза, включающие деструкцию тканей организмов при обмене веществ, поглощение О2, выделение СО2 и экскретов; газообмен с атмосферой; бактериальная деструкция детрита, прирост массы разлагающего детрит бактериопланктона, поступление при этом в воду растворенного органического вещества (РОВ); минерализация РОВ, NH4 и NO2, расходование при этом О2; процессы питания зоопланктона, ихтиофауны и моллюсков; процессы, связанные с дыханием моллюсков и олигохет, потребляющих растворенный кислород из водной толщи и выделяющих в водную толщу продукты метаболизма; отмирание организмов; взмучивание донных илов. В блоке «дно» имитируются процессы питания олигохет, потребления олигохет рыбами, динамики органической фракции донного ила. В двухслойном варианте модели бентос взаимодействует с нижним слоем водной толщи. В варианте модели с воздействием на экосистему токсического загрязняющего вещества (токсиканта) дополнительно имитируются следующие процессы: поступление токсиканта в организмы фитопланктона при биосинтезе; поступление токсиканта при внеклеточном бактериальном гидролизе детрита; изменение содержания токсиканта в организмах из-за выделительных процессов; разложение токсиканта в организмах. Модель также имитирует ассимиляцию токсиканта при питании организмов зоопланктона, ихтиофауны, моллюсков, олигохет; поступление токсиканта в планктоногенный детрит в составе фекалий организмов, отброшенной пищи и отмерших организмов; уменьшение содержания токсиканта в детрите из-за потребления детрита бактериопланктоном; поступление токсиканта в органическую фракцию донного ила в составе фекалий, отбросов пищи, отмерших организмов, осаждающихся взвешенных компонентов; уменьшение концентрации токсиканта в органической фракции донного ила из-за потребления органики олигохетами, минерализации органики донного ила, ветро-волнового взмучивания донного ила и разложения токсиканта в донном иле. Возможно изменение содержания токсиканта в воде, организмах планктона, планктоногенном детрите, взмученном донном иле, из-за проточности водоема, т.е. перемешивания его вод с поступающими в водоём речными водами.

В базовых численных экспериментах в качестве внутригодовой динамики температуры воды взят обобщённый внутригодовой ход температуры воды в малом арктическом озере Банное-2 острова Самойловского в дельте реки Лены, определённый в результате полевых исследований [4]. При этом антропогенное воздействие на экосистему не имитировалось. Внутригодовой ход фотосинтетически активной солнечной радиации в экспериментах был задан на основании климатических данных метеостанции Норильска о суммах суммарной солнечной радиации (в МДж/м2) при средних условиях облачности, поскольку широта этой станции (69°20´с.ш. наиболее близка к широте озёр на острове Самойловском - 72°37´ с. ш.) [5]. При этом учтена большая продолжительность полярной ночи по сравнению с широтой Норильска и более северное положение озёр. Разница между широтами Норильска и озёр на о. Самойловском составляет около 3.3 градусов. В Арктике средняя годовая сумма суммарной радиации на 80-й широте и 180° в. д. 2972 МДж/м2, а на 75-й широте и 170°в. д. ‒ 3055 МДж/м2 [6]. Поэтому в качестве ориентировочной величины было принято, что с увеличением широты на один градус годовая сумма солнечной радиации уменьшается на 16.6 МДж/м2. Следовательно, при перемещении с широты Норильска на широту о. Самойловского годовая сумма солнечной радиации должна приблизительно уменьшится на 49.8 МДж/м2. Годовая сумма солнечной радиации в Норильске равна 2910 МДж/м2. Поэтому в качестве ориентировочной величины годовой суммы солнечной радиации на о. Самойловском можно принять 2860.2 МДж/м2, что составляет 0.98 от этой величины в Норильске. Для построения внутригодового хода солнечной радиации в районе о. Самойловского средние суточные значения суммарной солнечной радиации для каждого месяца в Норильске были умножены на этот коэффициент. Полярная ночь в Норильске продолжается 45 суток с 30 ноября по 13 января. На широте острова Самойловский полярная ночь продолжается с 14 ноября по 28 января. Поэтому в январе часть месяца с наличием солнечного сияния уменьшается в 6 раз. В соответствующей пропорции уменьшена сумма солнечной радиации в январе. Принято, что фотосинтетически активная радиация (ФАР) составляет половину суммарной радиации.

В экспериментах приняты следующие морфометрические параметры озера: среднегодовой объём водоёма - 0.1 км3, коэффициент условного водообмена - 0.1, максимальная глубина водоёма при среднем уровне – 4 метра, форма котловины озера – шаровой сегмент. В эталонном численном эксперименте безлёдный период продолжается с 16 июня по 30 сентября, средняя толщина льда – 1 м. За последние 30 лет повышение температуры воздуха составляет в среднем на Европейском Севере – 0.02-0.03 градусов Цельсия в год, на севере Западной Сибири ‒ 0.03-0.07 градусов в год, на севере Якутии – 0.01-0.07 градусов в год [7]. Вероятно, повышение температуры воды в арктических озёрах не превышает этих темпов. Поэтому в эксперименте с имитацией потепления климата температура воды в безлёдный период увеличена на 1 градус, что соответствует увеличению температуры со скоростью 0.07 градусов Цельсия в год за 14 лет.

Также были выполнены ещё 2 эксперимента с имитацией потепления климата: с увеличением периода открытой воды на 20 суток – исчезновение ледяного покрова на 10 суток раньше, ледостав на 10 суток позже без изменения динамики температуры воды по сравнению с эталонным вариантом; комбинация увеличения продолжительности безлёдного периода с повышением температуры воды в течение этого периода на 1 градус Цельсия.

Для оценки степени изменения параметров функционирования экосистемы использована модификация критерия Нэша-Сатклиффа. Критерий Нэша-Сатклиффа используется для оценки моделей прогнозирования уровней или расходов рек. Для оценки различий между поведением имитационной компьютерной модели в двух численных экспериментах применялась модификация критерия:

$M=$ $\frac{\sum\_{i}^{}\left(Y\_{1i }- Y\_{2i}\right)^{2}}{\sum\_{i}^{}\left(Y\_{1i }- Y\_{av}\right)^{2}}\*100$ (1)

Здесь Y1i и Y2i обозначают значения компонента модели в сравниваемых экспериментах в одни и те же сутки с номером “i”, Yav ‒ среднее годовое значение компонента в одном из этих экспериментах. Номер “i” имеет все целые значения между 1 и 365. При сравнении результатов моделирования и данных мониторинга символ Yav в формуле 1 обозначает среднее годовое значение измеряемого параметра. Однако результаты двух численных экспериментов абсолютно равноправны. Поэтому мы дважды рассчитываем значение модификации критерия Нэша-Сатклиффа. В первом случае в знаменателе рассчитываются разности между значениями компонента в одном эксперименте и средним значением этого компонента в этом же эксперименте. В другом случае знаменатель рассчитывается по значениям, полученным в другом численном эксперименте сравниваемой пары результатов экспериментов. Для анализа используется среднее по двум значениям модифицированного критерия, рассчитанным в первом и втором случаях.

Значение модмфицированного критерия, меньшее 10% показывает крайне незначительное различие поведения модели в двух сравниваемых численных экспериментах в соответствии с динамикой по данного компонента. Диапазон 10-20% указывает на небольшое различие поведения модели в двух сравниваемых экспериментах, которое не может доказать существенные измения в функционировании модели экосистемы. Значения, большие 20% доказывают наличие таких кардинальных изменений.

По результатам численных экспериментов рассчитаны значения модификации критерия Нэша-Сатклиффа для сравнения динамики биомассы диатомовых водорослей и интнсивности первичного биосинтеза диатомовых водорослей в эталонном численном эксперименте и экспериментах с имитацией климатических изменений. В таблице 1 представлены результаты расчётов модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа. Символ «Т+1» обозначает сравнение этлонного численного эксперимента с экспериментом с увеличением температуры воды на 1 градус Цельсия в безлёдный период, «Лёд» ‒ увеличение безлёдного периода на 20 суток, «Лёд\_Т+1» ‒ увеличение безлёдного периода на 20 суток с одновременным увеличением температуры воды на 1 градус Цельсия.

Таблица 1. Значения (в %) модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа для сравнения «эталонного» эксперимента с экспериментами по имитации изменений климата.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Сравнение | Динамика биомассы диатомовых водорослей | Динамика интенсивности первичного биосинтеза диатомовых водорослей |
| Т+1 | 2.5 | 8.0 |
| Лёд | 6.5 | 29.3 |
| Лёд\_Т+1 | 13.2 | 39.4 |

Можно сделать вывод, что изменение сроков периода открытой воды повлияет на функционирование экосистемы сильнее, чем увеличение температуры водной толщи. При этом существенные изменения в функционировании экосистемы произойдут при одновременном увеличении температуры водной толщи и увеличении продолжительности безлёдного периода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-60291 Арктика «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата».

**Литература**

1. Стишов М.С. Особо охраняемые природные территории Российской Арктики: современное состояние и перспективы развития. Россия, изд-во «Скорость цвета», 2013.
2. Здоровеннова Г.Э., Федорова И.В. Термический режим малых арктических озер // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-8. – С. 1452-1456; URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=8172.
3. Tretyakov V., Dmitriev V., Sergeev Yu., Kulesh V. Monitoring of an aquatic ecosystem ecological status and assessment of its resistance to anthropogenic impacts by results of simulation \\ В сборнике: 19th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019 Conference proceedings. 2019. P. 485-492, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42460211>
4. Здоровеннова Г.Э., Шадрина А.А., Федорова И.В. Моделирование термического режима малых арктических озер // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 1. – С. 111-115; URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35752>
5. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Части 1-6. Многолетние данные. Выпуск 21. Красноярский край, Тувинская АССР. Книга 1. Ленинград. Гидрометеоиздат. 1990. 624 с.
6. Маршунова М.С., Мишин А.А. Справочник по радиационному режиму Арктического бассейна (дрейфующие станции). Под ред. А.Ф. Радионова. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 1994. 66 с.
7. Лисниченко В.В., Лисниченко Н.Б. Проблемы обеспечения безопасности жизнедеятельности коренных народов Севера в условиях изменения климата \\ Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всероссийской конференции с международным участием \ сост. С.В. Рябченко; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2014. – 199 с. С. 151-153.