

**Радчикова Н.П., Медвинский А.Б.** Использование моделей АРПСС для исследования многолетней динамики взвешенного вещества Нарочанских озер // Десятые Юбилейные Курдюмовские чтения «Синергетика в общественных и естественных науках»: материалы Международной междисциплинарной научной конференции с элементами научной школы для молодежи (22-26 апреля 2015, Тверь). Часть 2. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – С. 7-11.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ АРПСС  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ  
ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА НАРОЧАНСКИХ ОЗЕР**

**Н.П. Радчикова<sup>1</sup>, А.Б. Медвинский<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>*Белорусский государственный педагогический университет, Минск,  
Беларусь*

<sup>3</sup>*Институт теоретической и экспериментальной биофизики, Пущино,  
Россия*

*E-mail: radchikova@hotmail.ru*

Озера Нарочанской группы представляют собой систему из трех водоемов и являются объектом многолетних гидроэкологических исследований. Одним из основных параметров, интегрирующим в себе функциональные особенности озерных экосистем, является содержание взвешенного вещества (сестона). С этим компонентом экосистемы тесно связаны все аспекты биотического круговорота: продукция, трансформация и минерализация органического вещества. Сестон включает в себя много составляющих и может концептуально

рассматриваться как более высокий иерархический уровень, чем входящие в его состав компоненты – планктонные живые организмы и мертвая фракция (детрит) [1, 2]. Гидроэкологические наблюдения на различных этапах эволюции экосистемы Нарочанских озер, включая резкие внешние воздействия (природоохранные мероприятия и вселение моллюска *Dreissena polymorpha*), позволяют оценить динамику изменений содержания сестона как одного из ключевых компонентов водной экосистемы [2] и на основании этой динамики дать оценку произошедшим изменениям, а также попытаться прогнозировать численные параметры функционирования экосистемы.

Нарочанские озера имеют общую водосборную территорию и соединены между собой протоками. Трофность водоемов понижается от первого в каскаде озера Баторино к последнему – озеру Нарочь. На протяжении рассматриваемого периода (1978–2012 гг.) трофические условия в озерах изменялись от высокоэтрофных (оз. Баторино) до олиготрофных (оз. Нарочь). Пробы воды для измерения концентрации сестона отбирали ежемесячно во время вегетационного сезона (май-октябрь) на станциях постоянных наблюдений.

Для оценки характера динамики содержания сестона и прогноза в данной работе использовалась обобщенная модель авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС)  $(p, d, q)(p_s, d_s, q_s)$ , где  $p$  – порядок модели авторегрессии,  $d$  – порядок интеграции,  $q$  – порядок модели скользящего среднего,  $p_s$  – порядок авторегрессии сезонной составляющей,  $d_s$  – порядок интеграции сезонной составляющей,  $q_s$  – порядок скользящего среднего сезонной составляющей. Для выявления сезонной компоненты был использован спектральный анализ Фурье. Так как для построения моделей АРПСС все значения временного ряда должны отстоять друг от друга на равные промежутки времени, то немногочисленные пропуски в анализируемых рядах наблюдений заполняли относительно максимального или, если пропуск приходился на него, минимального значения конкретного года.

Визуальный анализ динамики концентрации сестона в период 1978-2012 гг. позволяет заметить два периода, отличающихся друг от друга по характеру изменений. Первый из них характеризуется высокоамплитудными колебаниями и более высокой средней концентрацией, а в течение второго периода амплитуда колебаний и средняя концентрация сестона существенно ниже. Такое изменение в характере динамики сестона в оз. Баторино и Мястро происходило в 1990 году, в оз. Нарочь – в 1991 году, что, по всей видимости, определяется расположением этого водоема в конце системы озер и его размерами. В связи с этим для оз. Нарочь рассматривали модели, предполагающие время интервенции (момент основного отклика

динамики концентрации сестона на комплекс факторов, обусловивших изменение структурной и функциональной организации экосистем озер) в 1990 и 1991 годах.

Анализ временных рядов концентрации сестона проводили с использованием следующих моделей: (I) наличие только сезонной компоненты, равной 6-ти месяцам, выявленной с помощью анализа Фурье, (II) наличие как сезонной компоненты, равной 6 месяцам, так и тренда и (III) наличие сезонной компоненты, равной 6 месяцам, а также интервенции. Для оценки качества предсказаний моделей вычисляли прогнозируемые значения для трех временных интервалов: (1) с 1990/91 года (с момента предполагаемой интервенции) до 2012 года, (2) с 1985 года по 1999 год, т.е. в течение 15-ти лет, когда происходили наиболее интенсивные изменения в характере исследуемой динамики, и (3) с 2003 года до конца ряда (последние 10 лет).

Результаты расчета средних абсолютных относительных ошибок, которые представляет собой усредненную абсолютную величину относительной ошибки, для наиболее удачных моделей из трех рассматриваемых групп (I-III) приведены в Табл. Из Табл. видно, что для оз. Баторино и оз. Мястро в случае прогнозов на 1990 – 2012 гг., а также на 1985 – 1999 гг. наименьшие значения ошибок имеют модели, предполагающие момент интервенции в 1990 г. (см. численные значения ошибок, выделенные жирным шрифтом). Аналогичный анализ для изменений концентрации сестона в оз. Нарочь показал, что в случае прогнозов на 1990/91 – 2012 гг. и 1985 – 1999 гг. наилучшими оказываются модели с интервенцией, причем год интервенции (1990 или 1991) не имеет особого значения.

Преимущество моделей, предполагающих интервенцию в 1990 г. в оз. Мястро, практически нивелируется при прогнозировании динамики сестона с учётом данных, полученных за последние 10 лет. На этом временном интервале модели, предполагающие наличие одной только сезонной составляющей, оказываются так же эффективны, как и модели, предполагающие наличие интервенции. Модели, предполагающие наличие тренда, характеризуются значительно более низкой предсказательной способностью, так как дают более высокие ошибки предсказаний (Табл.).

Таблица. Показатели относительной абсолютной ошибки (%) различных моделей АРПСС для динамики концентрации сестона озер Баторино, Мястро и Нарочь

Модель АРПСС	Период		
	1985-1999 гг	1990-2012 гг	2003-2012 гг
оз. Баторино			

(0,0,1)(0,1,1) только период	80	128	56
(0,0,1)(0,1,1) период и интервенция с 1990 г	<b>31</b>	<b>53</b>	<b>48</b>
(0,1,1)(0,1,1) период и тренд	152	62	102
оз. Мясстро			
(0,0,0)(0,1,1) только период	168	214	<b>29</b>
(0,0,0)(0,1,1) период и интервенция с 1990 г	<b>36</b>	<b>33</b>	<b>28</b>
(0,1,1)(0,1,1) период и тренд	125	152	43
оз. Нарочь			
(0,0,1)(0,1,1) только период	97	142	<b>22</b>
(0,0,1)(0,1,1) период и интервенция с 1990 г	<b>43</b>	<b>52</b>	<b>21</b>
(0,0,1)(0,1,1) период и интервенция с 1991 г	<b>41</b>	<b>52</b>	<b>22</b>

Для оз. Нарочь в период с 2003-го года практически все модели одинаково эффективны. Исключением является только модель (0,1,0)(0,1,1), предполагающая наличие сезонной составляющей и тренда. Таким образом, для описания динамики концентрации сестона в оз. Нарочь в период последних 10 лет одинаково подходят модели, предполагающие только наличие сезонной компоненты, и модели, предполагающие наличие сезонной компоненты и интервенции в 1990 либо 1991 г.

Из трех озер только для оз. Баторино в период с 2003 г. по 2012 г. наилучшими оказались модели, предполагающие интервенцию. Модели, предполагающие только сезонную компоненту дали более высокие ошибки предсказания (Табл.). Это может свидетельствовать о том, что динамика концентрации сестона этого озера в последнее десятилетие все еще испытывает на себе резкое воздействие, основной отклик на которое пришелся на 1991 год. Это свидетельствует также о разном времени реакции экосистем озер на интервенцию, при том, что оз. Баторино является первым в системе и соответственно раньше других подверглось воздействию факторов интервенции – снижению биогенной нагрузки и вселению дрейссены. Также оз. Баторино – наименьшее из трех озер по площади с самым быстрым водообменом. Можно предположить, что продолжительная реакция этого озера на интервенцию связана с изначально наблюдавшейся (с 1978 г) высокой

трофностью данного озера и, как следствие, более длительным периодом стабилизации после интервенции.

Таким образом, по результатам анализа временных рядов, можно утверждать, что интервенция характерна для всех озер Нарочанской группы: помимо закономерных сезонных флуктуаций имело место относительно резкое воздействие, приведшее к быстрому уменьшению и снижению абсолютных колебаний концентрации сестона. Для озер Баторино и Мястро основной отклик на это воздействие приходится на 1990 г., для Нарочи – на 1990 и 1991 годы.

Достаточно большие значения ошибок для всех без исключения моделей даже на небольших временных интервалах (2003-2012 гг.) и дополнительный анализ прогнозируемых значений на несколько шагов вперед, показавший, что даже самая удачная линейная модель не дает прогноза с приемлемой точностью даже на один шаг вперед, позволяют заключить, что модели АРПСС дают возможность охарактеризовать смену режимов функционирования экосистемы, но их использование для прогнозирования непродуктивно.

Авторы благодарны сотрудникам Белорусского государственного университета: Б.В. Адамовичу, Т.В. Жуковой, Е.В. Лукьяновой, Т.М. Михеевой, – предоставивших результаты своих многолетних наблюдений над колебаниями содержания сестона в Нарочанских озёрах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Остапеня А.П. Сестон и детрит как структурные и функциональные компоненты водных экосистем // Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Киев: Институт гидробиологии АН УССР, 1989, 42 с.

2. Остапеня А.П., Жукова Т.В., Михеева Т.М., Ковалевская Р.З., Макаревич Т.А., Жукова А.А., Лукьянова Е.В., Никитина Л.В., Макаревич О.А., Дубко Н.В., Карабанович В.С., Савич И.В., Верес Ю.К. Бентификация озерной экосистемы: причины, механизмы, возможные последствия, перспективы исследований // Труды БГУ, 2012, Т. 7, Ч. 1, С. 135–148.