

УДК 556:574.58

Т. В. ЖУКОВА, Н. П. РАДЧИКОВА, Б. В. АДАМОВИЧ, Т. М. МИХЕЕВА, Ю. К. ВЕРЕС, А. Б. МЕДВИНСКИЙ

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ НАРОЧАНСКИХ ОЗЕР НА ФОНЕ МНОГОЛЕТНИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Проанализированы данные о температурном режиме трех Нарочанских озер и температуре воздуха в Нарочанском регионе за последние пятьдесят лет. С помощью корреляционного анализа показано наличие слабых тенденций к многолетнему увеличению температуры для верхних (до 8 м) горизонтов оз. Нарочь и поверхностных (0,5 м) горизонтов оз. Мястро и Баторино. Отмечена прямая сильная связь между температурой воздуха и температурой воды на небольших и средних глубинах. Анализ Фурье, вычисление автокорреляций, построение и сравнение моделей АРПСС свидетельствуют об отсутствии выраженного тренда в изменении температуры воздуха на протяжении рассматриваемого периода. Отмечено, что кардинальные перестройки, произошедшие в структурной и функциональной организации экосистемы Нарочанских озер за последние 60 лет, с большой долей вероятности вызваны факторами, напрямую не связанными с глобальными климатическими изменениями, а именно существенным снижением антропогенной нагрузки на их водосбор, а также вселением в конце 1980-х гг. в озера мощнейшего фильтрата – моллюска *Dreissena polymorpha* Pallas, и произошедшими вслед за этим процессами бентификации.

**Ключевые слова:** Нарочанские озера; температура воды; температура воздуха; многолетняя динамика; корреляционный анализ; статистические модели.

The data of temperature conditions of Naroch lakes and air of the region for last fifty years are analyzed. The presence of weak tendencies of long-term increasing of temperature for top layers (up to 8 m) in Naroch lake and surface layers (0,5 m) in Mayastro and Batorino lakes by correlation analysis is shown. The right strong correlation between water and air temperatures on surface and middle water layers is marked. Fourier analysis, autocorrelations and autoregressive integrated moving average model shows the absence of evident trend in the changing of air temperature for concerned period. There is marked that fundamental changes in structural and functional conditions of Naroch lakes ecosystem are caused, most likely, by the factors, which are not concerned with global climatic changes directly. These factors are the decrease of anthropogenic influence on the catchment area and the processes of benthification, concerned with invasion in the lakes in the end of 1980s of powerful suspension feeder – mollusk *Dreissena polymorpha* Pallas.

**Key words:** Naroch lakes; water temperature; air temperature; the long-term dynamics; correlation analysis; statistic models.

Эволюция озерных экосистем и трансформация их биологических компонентов определяется совокупностью различных факторов, к основным из которых следует отнести климатические условия, а также структуру водосборной территории и антропогенное влияние на нее. В последнее время широко обсуждается еще один механизм воздействия человека, а именно влияние на глобальные и локальные климатические процессы и, как следствие, на экосистемы озер, для которых одним из ключевых абиотических факторов является температурный режим. Температурный эффект связан со всеми биологическими процессами, происходящими в озерных экосистемах, – от биохимической кинетики до изменения времени генерации отдельных видов [1]. Кроме того, увеличение температуры может сказаться на возрастании как внутренней (за счет интенсификации химических и биологических процессов в водоемах), так и внешней (за счет увеличения испарения) биогенной нагрузки на водоемы, причем это воздействие, особенно для фитопланктона, может оказаться более существенным, чем прямое влияние повышения температуры на жизненные процессы водных организмов [2].

Увеличение температуры воздуха и воды поверхностных водоемов в настоящее время объясняется с двух основных позиций: наличие тренда к повышению температуры в течение последнего столетия, обусловленное с большой долей вероятности антропогенным фактором, и наличие флуктуаций температуры с периодом 60–75 лет [3]. В первом случае считается, что повышение температуры будет продолжаться и далее и приобретать все более серьезные последствия для функционирования экосистем

поверхностных водоемов [4]. Исходя из второй концепции, температура в настоящее время находится на пике колебания и начнет понижаться в ближайшие годы [5].

В любом случае для объективного анализа трансформации экосистем озер необходимо установить возможное наличие тренда изменения температуры и оценить его влияние на водные объекты, в том числе в сравнении с другими важными факторами, воздействующими на развитие конкретной экосистемы. По отношению к Нарочанским озерам к таким факторам можно отнести природоохранные мероприятия на водосборной территории в рамках Государственной программы по экологическому оздоровлению озер в 1980-х гг. и инвазию и последующее массовое распространение в 1990-х гг. моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha* Pallas [6, 7]. Влияние климатических факторов можно выявить с помощью статистического анализа длительных рядов наблюдений.

#### Объекты и методы исследований

Озера Баторино, Мястро и Нарочь расположены на северо-западе Беларуси, принадлежат бассейну р. Неман, системе р. Нарочь. Эти три озера находятся на одной водосборной территории, связаны потоками, представляют собой единую экосистему [8], являются полимиктическими по типу перемешивания, но заметно различаются по морфометрическим и гидрологическим характеристикам (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых озер [9]

Показатели	оз. Баторино	оз. Мястро	оз. Нарочь
Площадь водного зеркала, км <sup>2</sup>	6,3	13,1	79,6
Объем водной массы, млн м <sup>3</sup>	18,7	70,1	710,0
Глубина, м (средняя/максимальная)	2,4/5,5	5,4/11,3	8,9/24,8
Время водообмена, год	1,0	2,5	10–11

В ходе исследований проанализированы данные о температурном режиме Нарочанских озер: с 1956 г. – Баторино, с 1966 г. – Мястро и Нарочь – по 2012 г. Температуру (°С) измеряли в глубоководной зоне озер на станциях и горизонтах постоянных наблюдений с помощью глубоководного термометра типа ТГ с ценой деления 0,1 °С. Наблюдения проводили 1–3 раза в месяц во время вегетационного сезона (май – октябрь). Учитывая полимиктический характер озер, т. е. отсутствие четко выраженной длительной стратификации в безледный период, температуру измеряли в оз. Баторино на глубинах 0,5; 3 и 5 м, в оз. Мястро – 0,5; 4; 7 и 9 м, в оз. Нарочь – 0,5; 3; 6; 8; 12 и 16 м. Данные о температуре воздуха за 1970–2011 гг. представлены Государственным учреждением «Республиканский гидрометеорологический центр». Измерения выполнены по регламентированной методике на ближайшей к Нарочанскому региону метеостанции в г. п. Шарковщина Витебской области.

Для статистического анализа изменений температурного режима были использованы два корреляционных метода: параметрический и непараметрический. При использовании параметрического метода вычисляли коэффициент линейной корреляции Пирсона, который позволяет обнаруживать линейные изменения – постоянное однонаправленное изменение температуры воды или воздуха. В случае использования непараметрического метода (поскольку данные температурного ряда могли не подчиняться закону нормального распределения) вычисляли ранговый коэффициент корреляции Спирмена, который нечувствителен к форме распределения.

Для более полного анализа длительных рядов наблюдений, зафиксированных в равноотстоящие друг от друга моменты времени (временных рядов), были применены статистические методы, предполагающие, что в развитии процесса можно выделить составляющие части, такие как: тренд, сезонная, циклическая и остаточная (случайная) компоненты. *Тренд* характеризует долговременную тенденцию развития некоторого явления, например постоянное повышение температуры воды на протяжении периода измерения. *Сезонная компонента* характеризует воздействие факторов, возникающих с определенной периодичностью, например повышение температуры воздуха летом и понижение зимой. *Сезонная компонента* температурного временного ряда ограничена одним годом или вегетационным сезоном. *Циклическая компонента* характеризует воздействие факторов, действующих с длительным (более года) периодом. *Остаточная компонента* выражает воздействие случайных факторов.

С помощью *детерминированной компоненты (тренд, сезонная и циклическая компоненты)* сделана попытка предсказывать значения временного ряда, с помощью случайной компоненты – величину возможного отклонения и вероятность такого отклонения. Для определения наличия тренда была вычислена последовательность коэффициентов автокорреляции, которые представляют собой линейные корреляции между последовательностями величин одного ряда, взятыми со сдвигом по времени. Были также построены графические отображения – коррелограммы, где величина коэффициентов автокор-

реляции выражена длиной столбиков, а направление связи – знаком. Если коррелограмма характеризуется быстрым затуханием (в пределах 15–20 шагов коэффициенты приближаются к нулю и не выходят за пределы доверительного интервала), это свидетельствует о том, что в данном временном ряду нет ни тренда, ни сезонной составляющей. Медленное убывание коррелограммы свидетельствует о том, что имеет место тренд. Наличие в коррелограмме явно выраженных пиков, которые регулярно чередуются, свидетельствует о присутствии сезонной компоненты. Для того чтобы исключить влияние сезонной компоненты и тренда и оценить случайную компоненту, были проведены интеграции рядов методом взятия конечных разностей с определенным периодом  $T$  (лагом) и построены новые временные ряды, в которых каждый член равен разности между двумя членами исходного временного ряда, отстоящими друг от друга на  $T$  шагов. После проведения интеграции опять построены коррелограммы и оценена сходимость к нулю коэффициентов автокорреляции для вновь построенного ряда. При отсутствии сходимости коррелограммы к нулю процедуру интеграции повторяли. Для выявления сезонной компоненты также был использован спектральный анализ Фурье [10].

С целью описания случайной компоненты временного ряда проведен подбор моделей авторегрессии и скользящего среднего (АРСС). Модель авторегрессии построена на основании линейной регрессии, в которой текущее значение ряда  $y_t$  является линейной комбинацией  $p$  предыдущих значений ряда и случайной ошибки  $\varepsilon_t$ :

$$y_t = \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \dots + \alpha_p y_{t-p} + \varepsilon_t.$$

Величина  $p$  ( $p \leq t$ ) называется порядком модели; величины  $\alpha_i$  – параметрами модели или коэффициентами модели авторегрессии;  $y_t$  – текущее значение ряда;  $y_{t-i}$  – предыдущие значения ряда в момент времени  $t-i$ .

Модель скользящего среднего построена на основании предположения о том, что текущее значение ряда  $y_t$  представляется в виде линейной комбинации текущей и прошлых значений ошибки  $\varepsilon$ :

$$y_t = \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \beta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q}.$$

Величина  $q$  ( $q \leq t$ ) называется порядком модели; величины  $\beta_i$  – параметрами модели или коэффициентами модели скользящего среднего;  $\varepsilon_t$  – значение ошибки на шаге  $t$ .

Временной ряд описан обобщенной моделью авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего АРПСС ( $p, d, q$ ); где  $p$  – порядок модели авторегрессии;  $d$  – порядок интеграции;  $q$  – порядок модели скользящего среднего. Порядки моделей авторегрессии и скользящего среднего подбирали на основании поведения автокорреляционной функции и требований выбора наиболее простой модели, характеризующейся наименьшими значениями  $p$  и/или  $q$ . С помощью авторегрессии была промоделирована и сезонность. Фактически это обычная модель с ограничением на параметры модели (равенство нулю параметров при лагах менее величины лага сезонной компоненты  $s$ ). Сезонная часть модели АРПСС строится по той же схеме, что и ее несезонная часть. На практике сезонность может сочетаться с обычной авторегрессией. Такую обобщенную модель обозначают АРПСС ( $p, d, q$ ) ( $p_s, d_s, q_s$ ), где  $p_s$  – порядок авторегрессии сезонной составляющей;  $d_s$  – порядок интеграции сезонной составляющей;  $q_s$  – порядок скользящего среднего сезонной составляющей. В сезонной части модели все эти составляющие оперируют с последовательными членами ряда, расположенными на расстоянии  $s$  друг от друга, где  $s$  – число отсчетов на период.

Адекватность модели определяли ее предсказательной силой, которую оценивали с помощью анализа ряда остатков (разностей между реально полученными значениями и значениями, предсказанными моделью, начиная с некоторого момента времени). Адекватная модель должна характеризоваться рядом остатков, который подчиняется закону нормального распределения и имеет среднее значение, близкое к нулю [11]. Для численной оценки адекватности модели вычисляли величину ошибки предсказания, представляющую собой отношение дисперсии ряда остатков к дисперсии исходного ряда данных [12].

#### Результаты исследований и их обсуждение

В целях проверки гипотезы о влиянии многолетних климатических изменений на температурный режим Нарочанских озер была рассчитана и проанализирована корреляция между годом измерения и средней для вегетационного сезона температурой воды на разных глубинах. В анализе участвовали только значения, полученные для четырех и более измерений за сезон. Коэффициенты корреляции, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что оба метода (параметрический и непараметрический) дают практически одни и те же результаты. Слабые тенденции к многолетнему увеличению температуры прослеживаются для верхних (до 8 м) горизонтов оз. Нарочь и поверхностных (0,5 м) горизонтов оз. Мястро и Баторино. При этом коэффициенты корреляции являются невысокими и находятся практически на пороге статистической значимости. Ни один коэффициент не превосходит величину 0,5.

Коэффициенты корреляции между температурой воды и годом измерения

Температура, °С, на глубине	Коэффициент корреляции Пирсона	Коэффициент корреляции Спирмена
Оз. Баторино ( $n = 45$ )		
0,5 м	<b>0,29</b>	<b>0,30</b>
3 м	0,27	0,28
5 м	0,23	0,22
Оз. Мясро ( $n = 45$ )		
0,5 м	<b>0,33</b>	<b>0,42</b>
4 м	0,22	<b>0,31</b>
7 м	0,09	0,26
9 м	-0,00	0,19
Оз. Нарочь ( $n = 47$ )		
0,5 м	<b>0,34</b>	<b>0,44</b>
3 м	<b>0,34</b>	<b>0,43</b>
6 м	<b>0,39</b>	<b>0,45</b>
8 м	<b>0,37</b>	<b>0,42</b>
12 м	0,18	0,27
16 м	-0,01	0,09

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые связи при  $p \leq 0,05$ .

Для подробного анализа временных изменений были рассмотрены среднегодовые значения температур воды на глубине 0,5 м (рис. 1), рассчитанные по среднемесячным температурам. Полициклический характер изучаемых озер, по всей видимости, обусловил то, что даже в поверхностном слое (0,5 м) не отмечено выраженных тенденций повышения температуры воды за исследованный период:

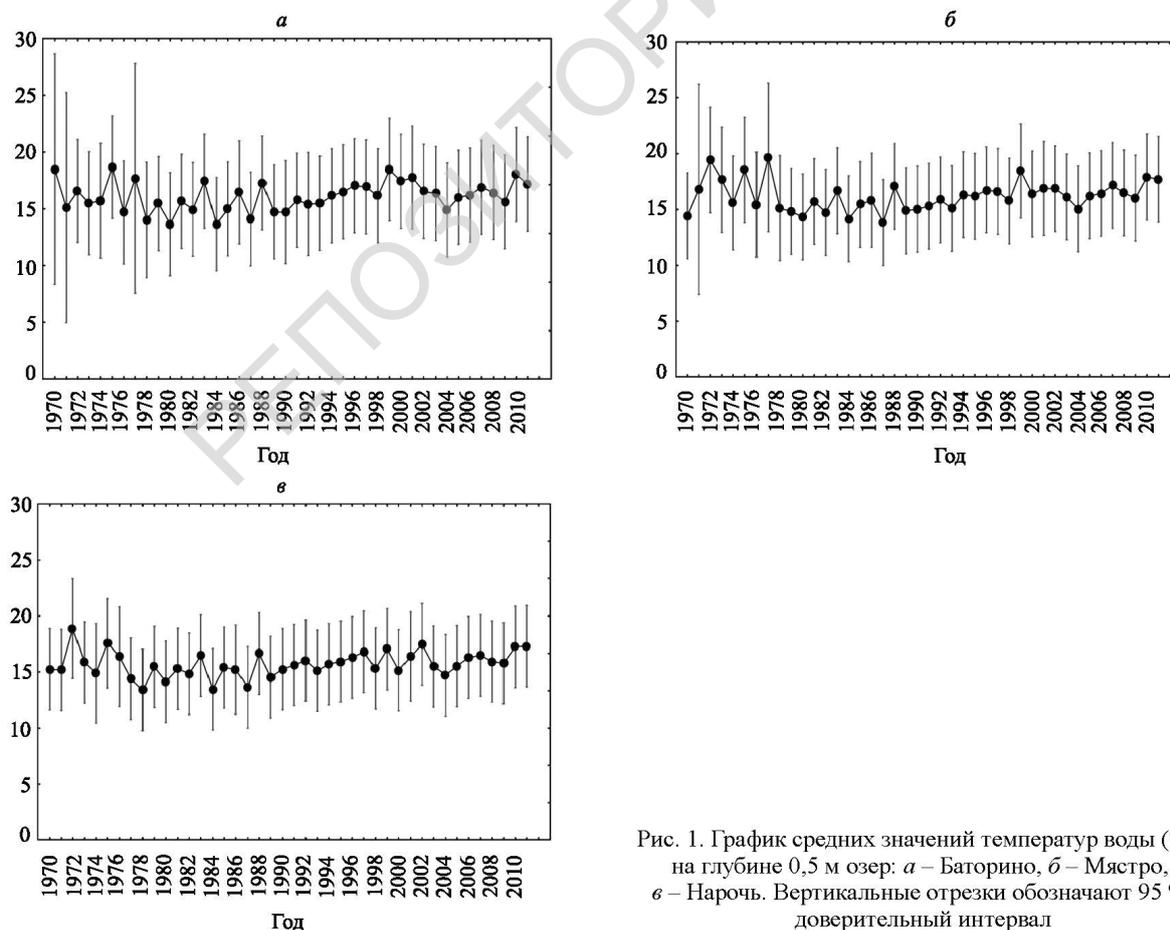


Рис. 1. График средних значений температур воды (°С) на глубине 0,5 м озер: а – Баторино, б – Мясро, в – Нарочь. Вертикальные отрезки обозначают 95 % доверительный интервал

95 % доверительные интервалы перекрываются, и тренд отсутствует. Аналогичные результаты были получены и для остальных глубин измерения. В то же время в двух изученных озерах Великобритании и Ирландии разница в повышении температуры воды в верхнем слое была четко связана с интенсивностью их перемешивания [13].

Более обоснованными приведенные выше заключения, на наш взгляд, выглядят с учетом проведенного анализа связи температуры воды с температурой воздуха и статистической обработки многолетних временных рядов температуры воздуха в исследованном регионе.

В целях оценки связи изменения температуры воды и температуры воздуха были рассчитаны корреляционные коэффициенты для разных глубин Нарочанских озер (табл. 3). Для расчета брали среднемесячные температуры воздуха в период проведения замеров температуры воды.

Таблица 3

#### Коэффициенты корреляции между температурой воды и температурой воздуха

Температура, °С, на глубине	Коэффициент корреляции Пирсона	Коэффициент корреляции Спирмена	<i>n</i>
Оз. Баторино			
0,5 м	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	218
3 м	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	219
5 м	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	219
Оз. Мястро			
0,5 м	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	218
4 м	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	219
7 м	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	219
9 м	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	218
Оз. Нарочь			
0,5 м	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>	238
3 м	<b>0,81</b>	<b>0,84</b>	238
6 м	<b>0,76</b>	<b>0,79</b>	238
8 м	<b>0,70</b>	<b>0,72</b>	238
12 м	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>	238
16 м	<b>0,47</b>	<b>0,46</b>	238

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые связи при  $p \leq 0,001$ .

Из табл. 3 видно, что существует прямая сильная связь между температурой воздуха и температурой воды на небольших и средних глубинах. Несмотря на полимиктичность озер, заметно, что по мере увеличения их глубины связи становятся слабее.

Сильная корреляционная связь между температурой воздуха и температурой воды позволяет сделать

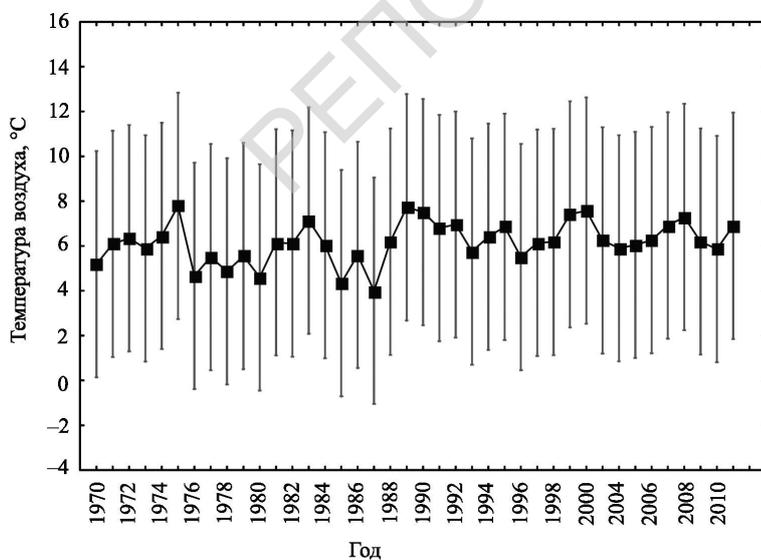


Рис. 2. График средних значений температур воздуха (°С). Вертикальные отрезки обозначают 95 % доверительный интервал

вывод об одинаковом поведении температурных рядов и свидетельствует, что термический режим озер напрямую определяется климатическими условиями. Это дает основание предположить, что для оценки влияния глобальных климатических изменений на экосистему Нарочанских озер обоснованным является анализ возможного многолетнего тренда изменения температуры воздуха в регионе. При этом более адекватным будет использование годового ряда температур (рис. 2).

Коэффициенты корреляции, рассчитанные между годом измерения и средней температурой каждого месяца, показали, что температура только в апреле и январе имеет слабую статистическую значимую связь с годом наблюдения (табл. 4).

Кoeffициенты корреляции между температурой воздуха и годами измерения ( $n = 40$ )

Месяц	Кoeffициент корреляции Пирсона	Кoeffициент корреляции Спирмена
Январь	0,25	<b>0,33</b>
Февраль	0,04	-0,002
Март	0,08	0,05
Апрель	<b>0,35</b>	<b>0,39</b>
Май	-0,18	-0,21
Июнь	0,04	0,04
Июль	0,31	0,23
Август	0,18	0,17
Сентябрь	0,17	0,17
Октябрь	0,28	0,29
Ноябрь	0,11	0,20
Декабрь	0,07	0,06

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые связи при  $p \leq 0,05$ .

Таким образом, корреляционный анализ показывает, что практически все связи между температурой воды на разных глубинах, температурой воздуха и годом измерения оказались слабыми и статистически незначимыми, т. е. такой анализ не дает оснований предполагать, что существует линейное изменение температуры воды и воздуха на протяжении всего периода измерения (более 40 лет). Однако корреляционный анализ как метод поиска связей имеет свои ограничения, не позволяет выявлять некоторые нелинейные изменения и нечувствителен к небольшим изменениям хотя бы одной из переменных. Возможно, что небольшое изменение среднегодовых и среднемесячных температур создает проблему ограниченного интервала данных (truncated range) и не дает проявиться имеющейся зависимости.

Для более полного анализа длительных рядов наблюдений за температурой воздуха были применены специальные методы работы с временными рядами, в частности модель АРСС. Исходный температурный ряд, последовательность автокорреляций (коррелограмма) и спектр Фурье для этого ряда представлены на рис. 3.

Коррелограмма и спектральный анализ отчетливо демонстрируют, что температурный ряд имеет явную периодичность в 12 мес. Поэтому была проведена процедура интеграции данного временного ряда с лагом 12. Временной ряд после процедуры интеграции представлен на рис. 4, а. Видно, что тренд отсутствует, и при этом последовательность автокорреляций (рис. 4, б) быстро затухает. Повторная интеграция с лагом 1 не принесла ощутимо иных результатов.

Описательная статистика по исходному ряду и двум его последовательным интеграциям представлена в табл. 5, из которой видно, что уже после первой интеграции среднее значение ряда становится близким к нулю, а вторая интеграция практически не уменьшает его, но несколько увеличивает стандартное отклонение.

Таблица 5

Описательная статистика для исходного ряда температуры воздуха и двух его последовательных интеграций

Ряд	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	$n$ , число измерений
Температура воздуха, °С (исходный ряд)	6,18	8,58	-16,28	21,70	480
Температура воздуха, °С (интеграция с лагом 12)	0,04	3,13	-11,69	12,00	468
Температура воздуха, °С (интеграция с лагом 12 и повторная интеграция с лагом 1)	0,01	3,95	-13,87	19,72	467

Были построены различные модели АРСС (как с добавлением тренда, так и без него) и вычислены показатели их адекватности. При построении первой модели исходили из предположения, что имеется только сезонная составляющая с периодом в 12 мес. При этом выбирали наиболее простые модели и оценивали их параметры. Если параметры были значимыми, то проводили оценку остатков и опреде-

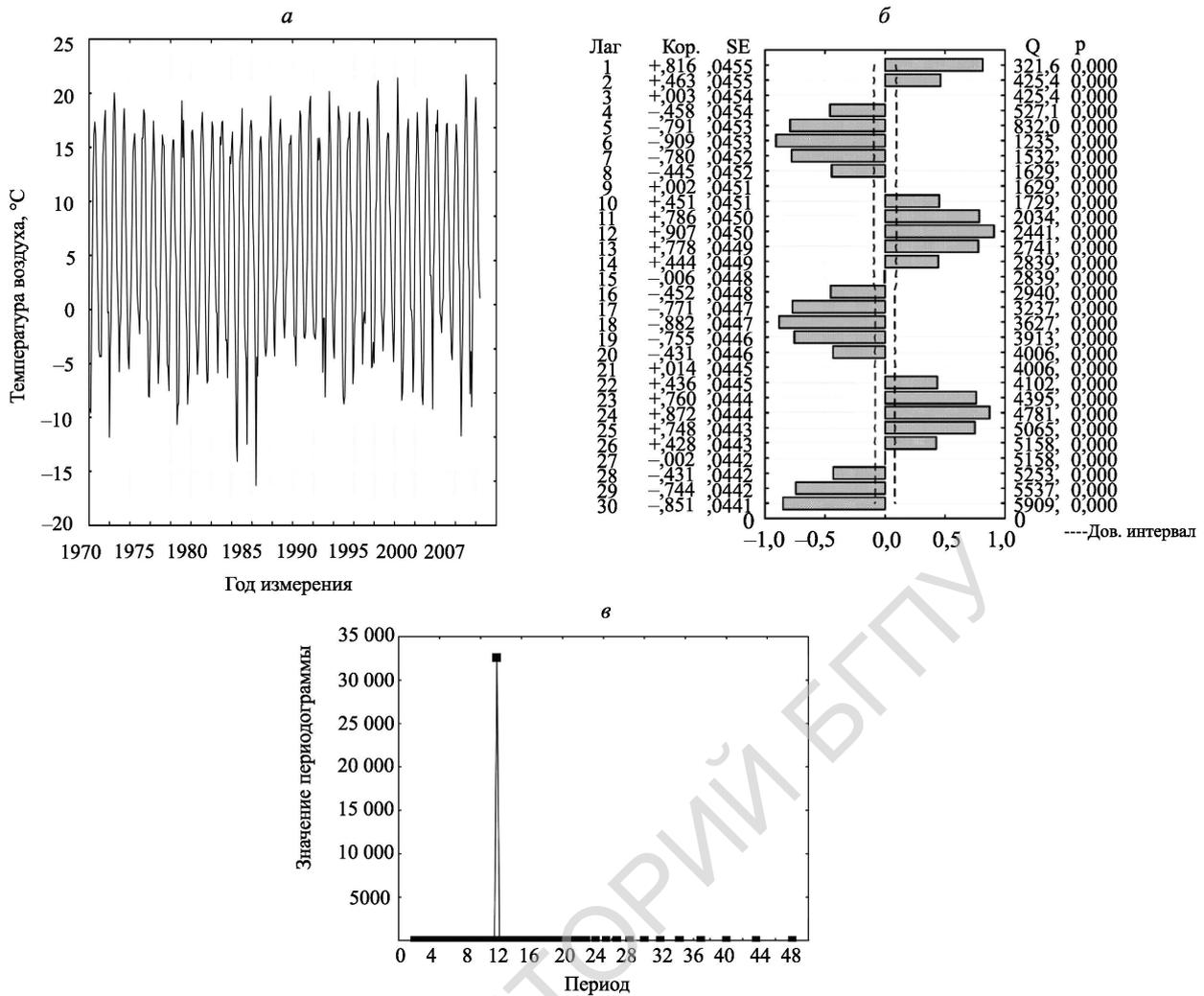


Рис. 3. Годовой ряд температур: *а* – временной ряд ежемесячных температур воздуха с 1970 по 2011 г.; *б* – его автокорреляционная функция; *в* – спектр Фурье

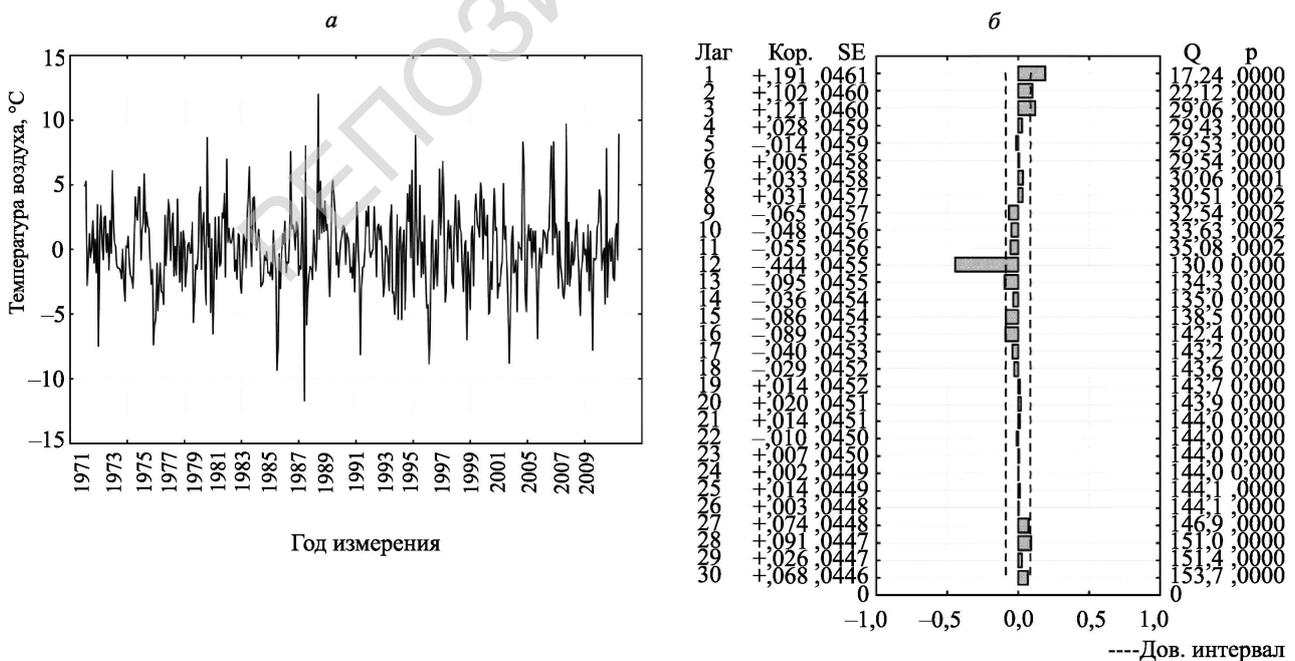


Рис. 4. Интеграция временного ряда с лагом 12: *а* – временной ряд температур воздуха; *б* – автокорреляционная функция этого ряда после интеграции с лагом 12

ление ошибки предсказания. Затем в модель добавляли дополнительные слагаемые и процесс повторялся. Если дополнительные параметры были незначимыми, то анализ остатков такой модели не проводили. Аналогично рассматривали модели, в которых учитывались и сезонная составляющая, и тренд.

Модели, параметры которых оказались значимыми, а также статистические критерии, характеризующие полученные ряды остатков, представлены в табл. 6. Из таблицы видно, что ни одна модель не дала нормального распределения остатков (критерий Шапиро – Уилка во всех случаях значимый), однако ошибка предсказания для большинства моделей мала, т. е. не превосходит 0,10. Тем не менее в моделях, в которых предполагается тренд, ошибка предсказания несколько выше и сами модели сложнее, что говорит об отсутствии превосходства этих моделей над моделями, построенными без учета тренда.

Таблица 6

**Описательная статистика, ошибка предсказания и результаты критерия Шапиро – Уилка для рядов остатков различных моделей изменения температуры воздуха**

Модель АРПСС	<i>n</i> , число точек ряда	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ошибка предсказания	Критерий Шапиро – Уилка
Модели без тренда								
(0,1,0)(0,0,1)	468	0,26	0,30	-9,84	8,85	6,00	0,08	$W = 0,980\ 74, p = 0,000\ 01$
(0,1,0)(1,0,1)	468	0,28	0,28	-9,90	8,34	5,94	0,08	$W = 0,983\ 22, p = 0,000\ 03$
(0,1,0)(1,0,1) с константой	468	0,06	0,07	-10,02	8,11	5,96	0,08	$W = 0,983\ 03, p = 0,000\ 03$
(0,1,1)(0,0,1)	468	0,24	0,31	-9,48	7,75	5,65	0,08	$W = 0,979\ 98, p = 0,000\ 01$
Модели с трендом								
(0,1,0)(0,1,1)	467	-0,13	0,00	-10,95	12,55	8,87	0,12	$W = 0,980\ 01, p = 0,000\ 00$
(0,1,1)(0,1,1)	467	-0,27	-0,22	-10,35	7,98	6,33	0,09	$W = 0,990\ 09, p = 0,003\ 09$
(0,1,2)(0,1,1)	467	-0,30	-0,20	-10,21	7,78	6,25	0,09	$W = 0,989\ 44, p = 0,001\ 92$
(1,1,2)(0,1,1)	467	-0,27	-0,20	-10,29	7,92	6,32	0,09	$W = 0,990\ 28, p = 0,003\ 56$

Таким образом, анализ Фурье, вычисление автокорреляций, построение и сравнение моделей АРПСС подтверждают результаты, полученные с помощью корреляционных методов, об отсутствии выраженного тренда в изменении температуры воздуха на протяжении всего периода измерения, что несколько отличается от выводов, сделанных на основании анализа температурных данных МС «Воложин» с 1946 по 2006 г., где было установлено, что среднемесячные температуры приобрели устойчивую тенденцию к повышению [14]. Есть сведения о повышении температуры на 0,074–0,12 °С в десять лет за последний век [15, 16]. Согласно заключению В. Ф. Логинова, глобальное современное потепление климата оказалось самым мощным за историю инструментальных наблюдений: в Северном полушарии рост температуры составил  $0,9 \pm 0,2$  °С. Скорость роста глобальной температуры за последние три десятилетия оказалась самой высокой, при этом повышение температуры поверхностного слоя Мирового океана в настоящий период не изменилось по сравнению с первой половиной XX в. и составило около 0,5 °С [17]. Изменение температуры приземного слоя воздуха в Карелии в среднем за 100 лет составило 0,2 °С [18]. По материалам 1945–2009 гг. для каждой из областей Беларуси сделан вывод, что современное потепление климата наиболее выражено в январе – апреле, несколько менее значительно в июле, августе и декабре и слабо выражено в остальные месяцы [19, 20]. Изменение температуры воды в озерах также подтверждается рядом исследователей. Так, температура в поверхностном слое воды в оз. Виндермиер (Великобритания) увеличилась на 1,4 °С с 1960 по 2000 г., в оз. Лох Фиг – на 0,7 °С [13]. По оценкам П. И. Кирвеля, за 1945–2007 гг. наблюдается устойчивое повышение температуры воды в озерах Белорусского Полесья и Белорусского Поозерья [21]. По оценкам того же автора, в озерах Нарочь и Червоное в безледовый период температура повышалась на 2,0 и 1,9 °С соответственно, в среднем на 0,5 °С каждые 10 лет (коэффициент аппроксимации линейного тренда ( $R^2$ ) равен соответственно 0,33 и 0,31) [22]. Исходя из наших данных, такие изменения не прослеживаются.

Отсутствие выраженного тренда в наших исследованиях может объясняться недостаточностью длины временного ряда и малыми изменениями температур в начале и конце ряда наблюдений. В данном анализе использовались среднемесячные данные, а они имеют большую дисперсию по сравнению с дисперсией среднегодовых температур. Такая разница в диапазонах измеряемых значений может препятствовать проявлению небольших по значению температурных изменений в зависимости от года.

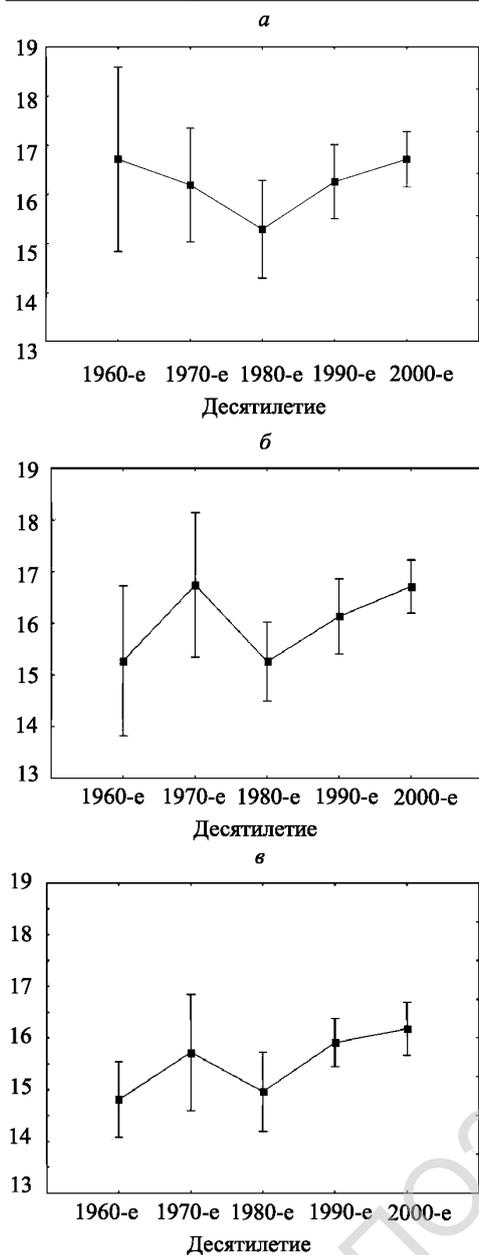


Рис. 5. Усредненные за десятилетия значения температуры воды (°С) в поверхностном слое (0,5 м) озер: а – Баторино, б – Мястро, в – Нарочь. Вертикальные отрезки обозначают 95 % доверительный интервал

Если рассматривать усредненные за десятилетия данные температуры воды в поверхностном слое Нарочанских озер, заметно отчетливое похолодание в 1980-е гг. и постепенный подъем температуры в озерах, продолжающийся и в настоящее время (рис. 5). Дисперсионный анализ показал, что при этом в оз. Баторино нет статистически значимых различий между рассматриваемыми десятилетиями, в оз. Мястро и Нарочь увеличение температуры в 2000-х гг. статистически значимо по сравнению с 1980 гг., но при этом никак не отличается от 1970-х гг.

Такие закономерности отмечены в литературе и для температуры воздуха. Так, при анализе временных изменений температуры в течение XX в. выделялись периоды потепления: с 1910 по 1945 г. и с 1976 по 2000 г., а между ними наблюдались периоды похолодания [23]. Потепление в 1900–30 гг. на Южном Урале сменилось периодом понижения температуры воздуха, а очередное потепление пришлось на 1945–2000 гг. (Оренбург) или на 1965–2000 гг. (Уфа) [24]. По материалам, приведенным в статье [25], за последние 100 лет происходит последовательная смена похолоданий (1910–20-е гг., 1960–70-е гг.) и потеплений (1930–50-е гг., 1980–2000-е гг.). Похолодания характеризовались снижением температуры на 0,2–1 °С, потепления – повышением температуры на 0,5–0,7 °С.

Отмеченная декадная динамика температуры в Нарочанских озерах очень похожа на отрезок регулярных (осцилляционных) глобальных изменений температуры, обусловленных, по мнению некоторых ученых, рядом циклических феноменов глобального масштаба [26–29].

Учитывая представленный анализ данных по температурному режиму региона Нарочанских озер в период проведения нами комплексного мониторинга их экологического состояния, можно с большой долей вероятности предположить, что многолетние изменения температуры не должны существенно влиять на биологические процессы, происходящие в этих озерах. Кардинальные перестройки, произошедшие в структурной и функциональной организации экосистемы за последние 60 лет [30], вызваны факторами, напрямую не связанными с глобальными климатическими изменениями. Есть все основания полагать, что современная эволюция экосистемы Нарочанских озер определяется существенным изменением антропогенной нагрузки на их водосбор (в результате природоохранных мер к середине 1980-х гг. внешняя биогенная нагрузка на экосистему снизилась примерно на 30%), а также вселением в конце 1980-х гг. в озера мощнейшего фильтрата – моллюска *Dreissena polymorpha* Pallas и произошедшими

вслед за этим процессами бентификации – смещения процессов трансформации вещества из толщи воды в придонный слой [30].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kingsolver J. G. The well-temperated biologist // *American Naturalist*. 2009. № 174. P. 755–768.
2. De Senerpont Domis L. N., Elser J. J., Gsel A. S., Huszar V. L. M., Ibelings B. W., Jeppesen E., Kosten S., Mooij W. M., Roland F., Sommer U., van Donk E., Winder M., Lurling M. Plankton dynamics under different climatic conditions in space and time // *Freshwater Biology*. 2013. № 58. P. 463–482.
3. Klyashtorin L. B., Lyubashin A. A. On the Coherence between Dynamics of the world fuel consumption and global temperature anomaly // *Energy and Environment*. 2003. № 14. P. 771–781.
4. Meehl G. A., Stocker T. F., Collins W. D., Friedlingstein P., Gaye A. T., Gregory J. M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J. M., Noda A., Raper S. C. B., Watterson I. G., Weaver A. J., Zhao Z. -C. Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 2007. P. 747–845.

5. Hansen J., Nazarenko L., Ruedy R., Sato M., Willis J., Del Genio A., Koch D., Lacis A., Lo K., Menon S., Novakov T., Perlwitz J., Russell G., Schmidt G. A., Tausnev N. The Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications // *Science*. 2005. № 308. P. 1431–1434.
6. Остапеня А. П. Современное экологическое состояние Нарочанских озер // *Природные ресурсы*. 1997. № 3. С. 95–102.
7. Остапеня А. П. Нарочанские озера: проблемы и прогнозы // *Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды* : материалы Междунар. науч. конф. (Минск – Нарочь, 20–25 сент. 1999 г.). Минск, 2000. С. 282–292.
8. Экологическая система Нарочанских озер / под ред. Г. Г. Винберга. Минск, 1985.
9. Аронов А. Г., Аронова Т. И., Власов Б. П., Ежова О. С., Жукова Т. В., Ковалевская Р. З., Костоусов В. Г., Лукьянова Е. В., Люштык В. С., Люштык О. В., Макаревич О. А., Милько А. Ч., Михеева Т. М., Никитина Л. В., Рудаковский И. А., Теляк В. С., Углянец А. А., Яцухно В. М. Водные ресурсы Национального парка «Нарочанский». Минск, 2012.
10. Суслов В. И., Ибрагимов Н. М., Талышева Л. П., Цыплаков А. А. Эконометрия. Новосибирск, 2005.
11. Витязев В. В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов. СПб., 2001.
12. Medvinsky A. B., Rusakov A. V. Chaos and order in stateless societies: Intercommunity exchange as a factor impacting the population dynamical patterns // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2011. № 44. P. 390–400.
13. George G., Hewitt D., Jennings E., Allott N., McGinnity P. The impact of changes in the weather on the surface temperatures of Windermere (UK) and Lough Feeagh (Ireland) // *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources Guimaraes (Portugal, July 11–14, 2005)*. 2005. P. 1–13.
14. Ковриго П. А. Изменения локального климата в условиях глобального потепления // *Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. 2010. № 2. С. 86–91.
15. Nodvin S. C. Global warming // *Encyclopedia of Earth*. 2009. URL: [http://www.eoearth.org/article/Global\\_warming](http://www.eoearth.org/article/Global_warming) (date of access: 25.02.2014).
16. Trenberth K. E., Jones P. D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J. A., Rusticucci M., Soden B., Zhai P. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge ; New York, 2007. P. 236–336.
17. Логинов В. Ф. Доказательная база и проблемные вопросы интерпретации результатов экспериментальных и модельных исследований изменений климата // *Новости науки и биотехнологий*. 2011. № 2 (19). С. 16–27.
18. Назарова Л. Е. Многолетние изменения температуры воздуха в Карелии // *География и природные ресурсы*. 2008. № 3. С. 75–79.
19. Камышенко Г. А. Оценка пространственно-временной однородности рядов температуры воздуха в Беларуси // *Природопользование*. 2011. Вып. 20. С. 26–34.
20. Камышенко Г. А. Динамика устойчивости температуры воздуха в Беларуси // *Сахаровские чтения 2011 года: экологические проблемы XXI века* : материалы 11-й Междунар. науч. конф. (Минск, 19–20 мая 2011 г.). Минск, 2011. С. 450.
21. Кирвель П. И. Рост температуры воды в озерах Беларуси в условиях изменения климата // *Сахаровские чтения 2011 года: экологические проблемы XXI века* : материалы 11-й Междунар. науч. конф. (Минск, 19–20 мая 2011 г.). Минск, 2011. С. 451.
22. Кирвель П. И. Закономерности формирования термического и ледового режимов озер Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Минск, 2010.
23. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Мониторинг климата и оценка климатической изменчивости по данным наблюдений // *Глобальные изменения климата и их последствия для России*. М., 2002. С. 9–39.
24. Шкляев В. А., Шкляева Л. С. Оценка изменений температуры воздуха и осадков Среднего и Южного Урала в XX веке // *Вестн. Челябин. гос. ун-та*. 2011. Вып. 5. № 5 (220). С. 61–69.
25. Еловичева Я. К., Дрозд Е. Н. Природная среда Беларуси в свете глобального потепления климата // *Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. 2005. С. 83–88.
26. Livingstone D. M. Ice break-up on Southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to North Atlantic Oscillation // *Limnol. Oceanogr.* 1999. Vol. 44 (6). P. 1486–1497.
27. Todd M. C., Mackay A. W. Large-scale climatic controls on Lake Baikal ice cover // *J. of Climate*. 2003. Vol. 16. P. 3186–3199.
28. George G., Hurley M., Hewitt D. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger lakes in the English Lake district // *Freshwater Biology*. 2007. Vol. 52. P. 1647–1666.
29. Gerten D. Climatic change, aquatic science, multiple shifts in paradigms // *Internat. Rev. Hydrobiol.* 2008. Vol. 93. P. 397–403.
30. 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.

Поступила в редакцию 06.03.2014.

**Татьяна Васильевна Жукова** – доктор биологических наук, директор Учебно-научного центра «Нарочанская биологическая станция им. Г. Г. Винберга» Белорусского государственного университета.

**Наталья Павловна Радчикова** – кандидат психологических наук, доцент факультета психологии Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка.

**Борис Владиславович Адамович** – кандидат биологических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией гидроэкологии БГУ.

**Тамара Михайловна Михеева** – доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

**Юлия Константиновна Верес** – кандидат биологических наук, старший сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

**Александр Берельевич Медвинский** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией биофизики возбуждаемых сред Института теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук.