

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ КАК РИСКИ СОВРЕМЕННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Т.Г. Потемкина, В.Л. Потемкин, А.П. Федотов

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

Во многих пресноводных водоемах мира, служащих, как правило, источниками питьевой воды, в настоящее время наблюдаются процессы эвтрофикации. Все больше исследований показывают потепление климата как основной природный фактор, способствующий развитию эвтрофикации. В последние годы в береговой зоне оз. Байкал, в котором сосредоточено около 20 % мировых запасов пресной воды, также обнаружены признаки эвтрофикации. В связи с этим впервые проведен комплексный анализ многолетних изменений климатических характеристик, способных провоцировать негативные изменения в береговой зоне озера. Установлено, что наибольшие аномалии климатических переменных пришлись на XXI столетие, а годы последнего десятилетия отличались наиболее благоприятными условиями для появления в озере негативных процессов (вспышек массового развития водорослей и водной растительности, гниение их остатков на дне и берегах, изменение в структуре и зональности биоценозов и т.д.). Повышенная температура воздуха и прибрежных вод озера, пониженное количество осадков, уменьшение притока речных вод в Байкал и понижение уровня воды озера, маловодный период, ослабление ветровых потоков, водообменных процессов и, следовательно, самоочищения — основные природные условия, способствующие негативным экологическим проявлениям. В период продолжающегося глобального потепления влияние климата на процессы в береговой зоне озера требует особого внимания и долгосрочного мониторинга для выявления современных и ожидаемых изменений экологического состояния оз. Байкал, а также для более обоснованной их интерпретации.

Глобальное потепление, климатические факторы, эвтрофикация, озеро Байкал

CLIMATIC FACTORS AS RISKS OF RECENT ECOLOGICAL CHANGES IN THE SHALLOW ZONE OF LAKE BAIKAL

T.G. Potemkina, V.L. Potemkin, and A.P. Fedotov

Eutrophication processes have been recorded in many world's freshwater reservoirs, which are sources of drinking water. More and more investigations show that global warming is the main natural factor that causes eutrophication. In recent years, signs of eutrophication have also been recorded in Lake Baikal containing 20% of the world's freshwater reserves. Therefore, we performed the first comprehensive analysis of long-term changes in climatic parameters capable to provoke negative changes in the shallow zone. The largest number of anomalies of climatic indices has been recorded in the 21st century. Moreover, the current decade has been the most favorable for the emergence of negative processes in the lake (outbreak of the mass growth of algae and aquatic vegetation, rotting of their remains at the bottom and on the shores of the lake, changes in the structure and zoning of biocoenoses, etc.). The main natural conditions favoring the emergence of negative signs are elevated temperatures of the air and lake shore water, reduced amount of precipitation, reduced inflow of river waters into Baikal and lowering of its water level, low-water season, and weakening of wind currents, water exchange processes, and, as a result, water self-purification. In the period of continuing global warming, it is necessary to study the climate effect on the processes in the shallow zone and to carry out long-term monitoring for elucidation of recent and expected changes in the ecological state of Lake Baikal and for their valid interpretation.

Global warming, climatic factors, eutrophication, Lake Baikal

ВВЕДЕНИЕ

Байкал — самый большой на планете резервуар пресной воды высокого качества. В нем сосредоточено около 20 % мировых запасов пресных вод, нехватка которых ощущается уже сегодня. С 1996 г. Байкал является природным объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. Это значит, что охрана вод озера от загрязнения, истощения и рациональное их использование являются приоритетными задачами Российской Федерации, несущей ответственность за сохранение природы Байкала перед всем миром. В настоящее время особое внимание уделяется экологическому состоянию береговой зоны озера. На ее отдельных участках наблюдаются негативные экологические процессы: вспышки «цветения» воды (бы-



Рис. 1. Цветение водорослей в пресноводных водоемах.

1 — оз. Эри (2015, Фото: Эрик Альбрехт); 2 — оз. Бива (2012, распространение макрофитов и перифитона в озере, <http://www.nhm.ac.uk>); 3 — оз. Чаоху (2015, Фото: REUTERS/ Stringer, <http://www.chinatopix.com/tags/lake-taihu>); 4 — оз. Тайху (2015, рабочие очищают водоросли с труб водоснабжения города Уси питьевой водой, Фото: Лю Цзинь/AFP/Getty Images); 5 — р. Волга — Куйбышевское водохранилище (2013, Фото: Д.В. Варенова, <http://новости.симбирск.рф/2013/07/755>); 6 — оз. Виннипег (2015, Фото: файл, <http://www.manitabacooperator.ca/comment/prairie-water-woes-need-collective-action-not-more-words>); 7 — оз. Байкал — Баргузинский залив, вблизи села Максимиха (2016, <http://www.irk.ru/news/20160801/spot/>); 8 — оз. Байкал (гниение водорослей на пляже, Фото: russianstock.ru, <http://www.infpol.ru/news/society/73770-irkutskie-vlasti-khotyat-ponyat-otkuda-poyavilas-spirogira-nabaykale/>).

строе размножение цианобактерий) и массовое развитие нитчатых водорослей (малочисленной ранее водоросли рода *Spirogyra*); интенсивное зарастание прибрежных мелководий водорослями и водной растительностью и засорение пляжей их остатками, выброшенными волнениями; появление неприятного запаха в результате гниения этих выбросов; скопление погибших моллюсков на пляжах в отдельных районах; заболевание эндемичной байкальской губки, являющейся природным фильтром воды озера; фекальное загрязнение прибрежных вод [Кравцова и др., 2012; Тимошкин и др., 2014; Kravtsova et al., 2014; Белых и др., 2015а,б; Калюжная, Ицкович, 2015; Ицкович и др., 2015; Timoshkin et al., 2016; и др.].

Вспышки бурного развития цианобактерий (синезеленых водорослей), способных продуцировать опасные для жизни человека токсины, нитчатых водорослей, рост их продуктивности, быстрое зарастание прибрежных мелководий, скопление на пляжах остатков водорослей и высшей водной растительности, их гниение, изменение в структуре биоценозов — одни из основных общепризнанных показателей (признаков) эвтрофирования водных объектов, которые негативно влияют на качество воды, экологию водной экосистемы в целом, водоснабжение, рекреацию и др. [Hallegraeff, 1993; Schindler, 2006; Le et al., 2010; Kravtsova et al., 2014; Селезнёва и др., 2014; Зайцева, 2014; Izmest'eva et al., 2015; Timoshkin et al., 2016; Бондаренко, Логачева, 2016; Зилов, 2016; и др.]. В современных условиях нестабильности климата и быстро растущего антропогенного прессинга на окружающую среду более 40 % водоемов планеты испытывают умеренную или тяжелую эвтрофикацию [Xia et al., 2016]. Так, интенсивное цветение продуцирующих токсины синезеленых водорослей представляет угрозу крупным водоемам мира — источникам питьевой воды (рис. 1). Это такие озера, как Цюрихское в Швейцарии, Виктория в Африке, Эри и Окичоби в США, Виннипег в Канаде, Тайху и Чаоху в Китае, Кинерет в Израиле, Бива и Касумигаура в Японии и др. В оз. Байкал факты эвтрофирования (см. рис. 1, № 7-8) имеют локальный характер и относятся к отдельным районам [Кравцова и др., 2012, Kravtsova et al., 2014; Izmest'eva, 2015; Зилов, 2016].

Совсем недавно доминировала академическая точка зрения на вопрос эвтрофикации, объясняющая этот процесс антропогенным загрязнением и главным образом повышенным содержанием азота и фосфора в городских, сельскохозяйственных, промышленных сточных водах, поступающих в водные объекты [Whitehead et al., 2009; Moss et al., 2011; Кравцова и др., 2012; Тимошкин и др., 2014; и др.]. Но в последние годы все больше внимания стало уделяться роли климатического фактора в эвтрофировании водных объектов. Потепление климата, как показали исследования, — это тот природный фактор, который способен стимулировать процессы эвтрофикации в пресноводных экосистемах [Bar-Yosef et al., 2010; Qin et al., 2010; Moss et al., 2011; Posch et al., 2012; Paerl, Paul, 2012; Zhang et al., 2012; Paerl, Otten, 2013; Селезнёва и др., 2014; Зайцева, 2014; Cohen et al., 2016]. Так, например, в Волжских водохранилищах в летний период 2010 г. в результате сложившихся аномальных природных условий (высокая температура воздуха и воды, осадки ниже нормы, маловодье, безветренная погода, снижение динамики водных масс) развитие синезелёных водорослей увеличилось в 2—9 раз (май—сентябрь) по сравнению с предыдущим 2009 г. [Селезнёва и др., 2014]. По данным Всемирной метеорологической организации, 2010 г. — один из самых жарких за всю историю метеонаблюдений. В этот же год численность синезеленых водорослей достигла максимума в самых крупных водохранилищах Удмуртии (Ижевском и Воткинском) по тем же причинам [Зайцева, 2014]. Участвовавшие вспышки размножения цианобактерий в европейских озерах связывают с уменьшением температурного градиента между поверхностными и придонными водами и ослаблением весеннего перемешивания водных масс из-за более теплых зим. Холодные зимы и сильные ветры, как отмечено в [Posch et al., 2012], препятствовали бы развитию процесса цветения воды. В последние два десятка лет на оз. Тайху в Китае активное размножение цианобактерий начинается раньше и длится дольше с повышением температуры, увеличением часов солнечного сияния и уменьшением скорости ветра. Среди всех климатических факторов скорость ветра и продолжительность солнечного сияния выделяются как основные, влияние которых на процесс «цветения» воды наиболее значимо (84.6 %) [Zhang et al., 2012]. В озерах Цюрихское и Кинерет, несмотря на многолетние усовершенствования очистных сооружений и уменьшение биогенных веществ в сточных водах, продолжают происходить вспышки массового размножения цианобактерий, что связывают с изменением климата [Bar-Yosef et al., 2010; Posch et al., 2012].

Специальных исследований по изучению влияния климатических изменений на появление признаков эвтрофикации в береговой зоне Байкала не проводилось. Имеются лишь единичные работы, в которых косвенно или в некоторой степени затрагивается этот вопрос. Так, увеличением температуры воздуха и прогревом прибрежных вод, а также антропогенной нагрузкой объясняется появление продуцирующих опасные токсины цианобактерий в августе 2010 г. в прибрежной зоне у пос. Турка на Среднем Байкале [Белых и др., 2015а, б]. В статье [Бондаренко, Логачева, 2016] структурные изменения в прибрежном фитопланктоне, обнаруженные в некоторых районах Байкала, считают свидетельством эвтрофирования прибрежной зоны озера и также предполагают влияние климата на этот процесс. Анализ собранного материала по всей акватории Байкала за 1977–2003 гг. показал, что изменения, связан-

ные с потеплением (увеличение температуры поверхности воды, прозрачности воды, изменение в структуре биоценозов), произошли в Байкале, но не имеет место широкое распространение эвтрофикации в пелагиали озера [Izmet's'eva et al., 2015]. По наблюдениям за состоянием планктона с 1945 г. на одной вертикали, расположенной в Южном Байкале на расстоянии 2.7 км от берега и с глубиной 800 м, авторы [Зилов и др., 2016] пришли к выводу, что общее состояние в целом стабильно, хотя отмечаются и некоторые тренды (изменения в структуре планктона). Наиболее вероятными причинами этих трендов являются либо природные флуктуации, либо это часть неких долговременных автоколебательных процессов в экосистеме озера, либо глобальное изменение климата, и не вполне вероятная причина — следствие регионального загрязнения [Зилов и др., 2016]. В других работах [Кравцова и др., 2012; Тимошкин и др., 2014; Timoshkin et al., 2016] процессы эвтрофикации в прибрежной зоне отдельных районов Байкала (значительное увеличение бентоса, обилие водорослей и сдвиги в зональности и др.) связывают со сбросом в озеро недостаточно очищенных сточных вод. В то же время гидрохимические исследования последних лет в целом не выявили значительных изменений в биогенной нагрузке по сравнению с 1950-ми и 1960-ми годами за исключением участков вблизи населенных пунктов, устьевых взморьев некоторых рек, отдельных заливов и соров [Томберг и др., 2012; Бондаренко, Логачева, 2016; Сакирко и др., 2016].

Потепление климата и его влияние на эвтрофикацию пресноводных экосистем происходит во всем мире. Сигналы этого процесса наблюдаются и на Байкале. Цель настоящей работы — анализ многолетних изменений наиболее чувствительных характеристик климата, способных стимулировать процессы эвтрофикации в береговой зоне оз. Байкал, с учетом региональных особенностей потепления климата. Такой анализ важен для будущих исследований, выявления современных и ожидаемых изменений экологического состояния оз. Байкал, а также для более обоснованной их интерпретации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами для исследований послужили многолетние данные гидрометеорологических наблюдений на 15 станциях сети Росгидромета в бассейне оз. Байкал (рис. 2). Наблюдения за основными гидрологическими и климатическими характеристиками на станциях Росгидромета проводятся регулярно в фиксированные сроки (так называемые «срочные» наблюдения — несколько измерений в течение суток). По результатам этих измерений определяются месячные, сезонные и годовые значения характеристик.

Поскольку проявления процессов эвтрофикации в Байкале отмечены в теплый период (май—октябрь), анализ гидрометеорологических данных проводился за этот сезон на основе временных рядов среднемесячных и средних сезонных значений рассматриваемых переменных: температуры воздуха и средней скорости ветра, измеряемых на станциях на высоте 2 и 10–12 м от поверхности земли, температуры воды в поверхностном (50 см) слое в прибрежной зоне озера, атмосферных осадков, прямой солнечной радиации. Графическое выражение многолетних изменений переменных за сезон май—октябрь выполнено на основе данных, осредненных по станциям на побережье Байкала.

Аномалии определены как отклонения наблюдаемых значений от нормы, за которую принято среднее значение рассматриваемой переменной за 1961—1990 гг. Всемирной метеорологической организацией этот период рекомендован в качестве базового для лучшего понимания изменений климата на протяжении этого века и за его пределами, мониторинга и оценки долгопериодных климатических изменений.

Исследование связи гидрометеорологических характеристик, установление тенденций и их оценка проводилась методами статистического анализа. Методом парной корреляции устанавливались связи между гидрометеорологическими переменными. Для оценки изменений изучаемых переменных за некоторый интервал времени определялись коэффициенты линейного тренда.

Концентрация хлорофилла «а» в приповерхностном слое в оз. Байкал в течение 2013—2017 гг. получена на основе спутниковых данных MODIS-Aqua с пространственным разрешением в 0.5 км <https://worldview.earthdata.nasa.gov>. Эти данные сопоставлялись с климатическими параметрами (с высоким разрешением — 6 ч или 1 день) некоторых метеостанций www.rp5.ru и <http://www.ncdc.noaa.gov>.

За начало современного потепления в соответствии с ходом глобальной температуры принят 1976 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воздуха. Изменение величины температуры воздуха — это реакция природной среды на глобальное потепление. В Северном полушарии с середины 1970-х гг. наблюдается рост температуры, достигшей максимума в 2016 г. [Доклад..., 2016]. Скорость роста среднегодовой температуры за период 1976—2016 гг. составила для земного шара +0.17 °C за 10 лет, для Северного полушария +0.34 °C/10 лет, для России и Байкальского региона +0.45 °C/10 лет и +0.34 °C/10 лет соответственно [Доклад..., 2016] (табл. 1). Эти данные показывают, что климат в Байкальском регионе более чувствителен к глобальному потеплению, чем климат земного шара в целом.

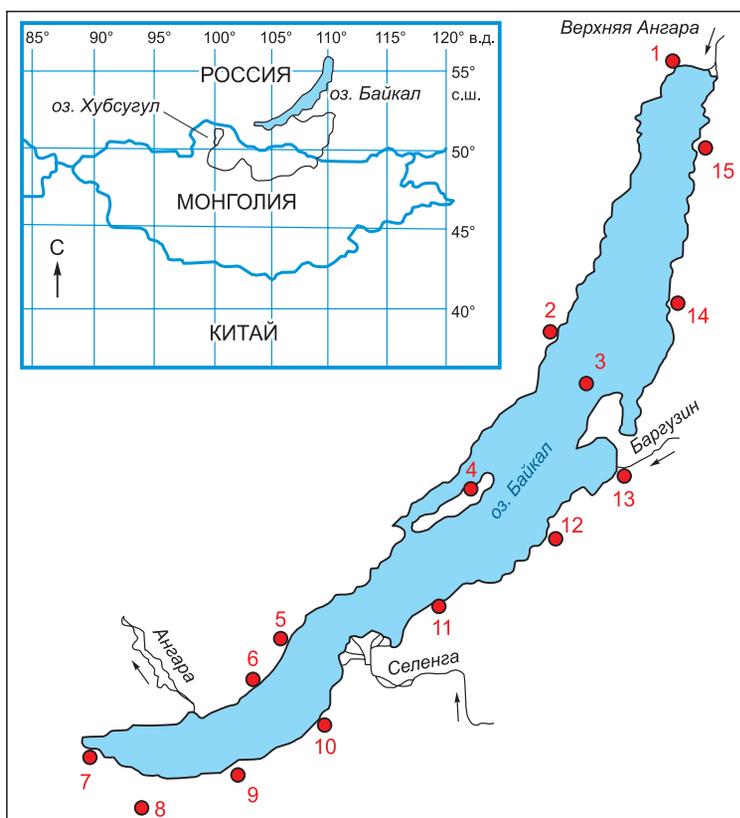


Рис. 2. Схема расположения гидрометеорологических станций.

1 — Нижнеангарск, 2 — Солнечная, 3 — Большой Ушканий остров, 4 — Хужир, 5 — Песчаная бухта, 6 — Большое Голоустное, 7 — Слюдянка, 8 — Хамар-Дабан, 9 — Танхой, 10 — Бабушкин, 11 — Сухая, 12 — Горячинск, 13 — Усть-Баргузин, 14 — Давша, 15 — Томпа.

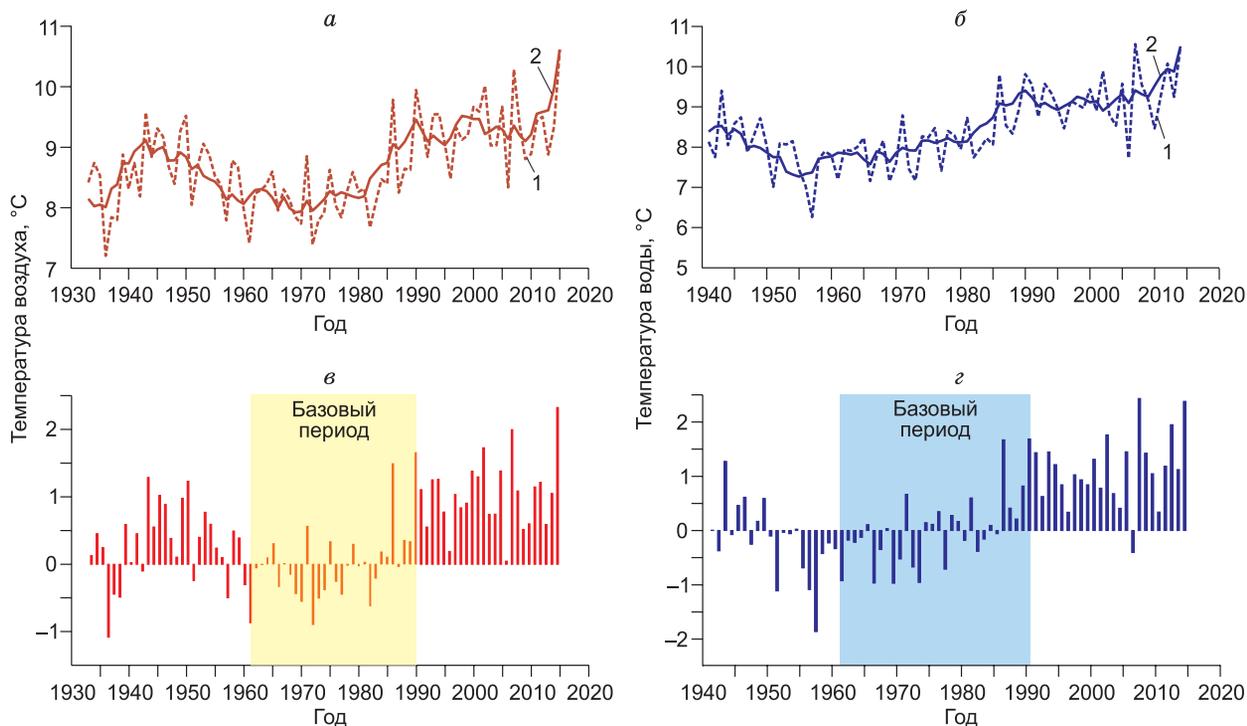


Рис. 3. Изменения сезонной температуры воздуха на побережье оз. Байкал, температуры воды в прибрежной зоне и их аномалии за многолетний период.

Многолетние изменения сезонной (май—октябрь) температуры воздуха (а) и воды (б), аномалии сезонной температуры воздуха (в) и воды (г). Многолетние изменения переменной (1) и ее пятилетние скользящие осреднения (2). Аномалии — отклонение от «нормы» (среднего значения за май—октябрь 1961—1990 гг.).

Многолетнее изменение сезонной (май—октябрь) температуры воздуха ($T_{\text{вх}}$) иллюстрирует рисунок 3, а. За базовый период 1961—1990 гг. среднее значение сезонной температуры воздуха составило 8.3 °С, а в последующие годы (1991—2015 гг.) оно увеличилось до 9.3 °С. Скорость роста сезонной температуры воздуха за 1976—2015 гг. составила +0.37 °С/10 лет.

Аномалии сезонной (май—октябрь) температуры воздуха ($\Delta T_{\text{вх}}$) представлены на рис. 3, б. Четкая тенденция к положительным аномалиям отмечается в течение 1985—2015 гг. Наиболее теплые годы пришлись на XXI в.: 2015 г. — $\Delta T_{\text{вх}}$ 2.33 °С, 2007 г. — $\Delta T_{\text{вх}}$ = 1.99 °С, 2002 г. — $\Delta T_{\text{вх}}$ 1.73 °С (табл. 2).

Температура воды. На рис. 3, в отражены многолетние изменения температуры воды ($T_{\text{вд}}$) в прибрежной зоне оз. Байкал за сезон май—октябрь. За базовый период среднее значение $T_{\text{вд}}$ в прибрежной зоне в мае—октябре составило 8.1 °С, а за 1991—2015 гг. оно увеличилось до 9.2 °С. С 1976 г. температура воды в прибрежной зоне в мае—октябре повышалась со скоростью +0.39 °С за 10 лет. После базового периода аномалии сезонной температуры воды ($\Delta T_{\text{вд}}$) имеют положительный знак, лишь в 2006 г. аномалия отрицательна (см. рис. 3, з).

Как известно, повышение температуры воздуха напрямую способствует увеличению температуры воды. Годы с наиболее прогретой водой в прибрежной зоне озера в мае—октябре пришлись на XXI в., так же как и годы с наибольшей температурой воздуха (табл. 2). Изменения температуры воздуха в районе Байкала и температуры воды ($T_{\text{вд}}$) в его прибрежной зоне находятся в тесной взаимосвязи, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции (табл. 3). Самая низкая взаимосвязь между станциями Хамар-Дабан и Танхой (0.54). Объясняется это тем, что метеостанция Хамар-Дабан — это горная (1500 м) удаленная от озера станция с другими погодными условиями. Многолетние изменения $T_{\text{вд}}$ в прибрежной зоне Байкала за теплый сезон (май—октябрь) в целом отражают ход температуры воздуха (см. рис. 3, а, в).

Ветровой режим. В последнее время ученые все больше внимания уделяют такому климатическому фактору, влияющему на водные экосистемы, как режим ветра [Мао et al., 2008; Su et al., 2012; Coumou et al., 2015]. В целом ветер может и препятствовать, и способствовать развитию негативных процессов в водоемах. Сильные ветры с большими скоростями могут влиять, например, на скорость вдольбереговых потоков и циркуляцию вод, перемешивание и температуру воды, миграцию и трансформацию загрязняющих веществ и др., что сдерживает разрастание и цветение водорослей. Ослабление ветровых потоков, наоборот, способствует активизации процессов эвтрофикации в водоемах.

В последние десятилетия на фоне повышения глобальной температуры в умеренных широтах Северного полушария, а также на большей части территории России наблюдается уменьшение средней и максимальной скорости ветра [Мещерская и др., 2008; Булыгина и др., 2013; Coumou et al., 2015], т.е. происходит снижение активности и интенсивности ветровых потоков. На территории между 35° и 70° с. ш. кинетическая энергия ветров с 1979 по 2013 г. в целом снизилась в летнее время на 8–15 % [Coumou et al., 2015]. Это означает, что ветровые потоки ослабевают, летних штормов становится меньше и понижается их интенсивность. А без штормов повышается вероятность затяжной аномальной летней жары, засух, т.е. создаются благоприятные условия для массового размножения водорослей и появления признаков эвтрофикации. Подобная картина наблюдается и на Байкале. Многолетний ход средней скорости ветра ($W_{\text{вт}}$) за сезон май—октябрь (рис. 4, а) показывает ее уменьшение с 1976 г. на величину

Таблица 1. Оценки линейного тренда среднегодовой температуры приземного воздуха за 1976—2016 гг.

| Регион | 1976—2016 гг. (41 год) | |
|--------------------|---------------------------|----------|
| | <i>b</i> | Δ |
| Земной шар | + 0.17 | 0.68 |
| Северное полушарие | + 0.34 | 1.36 |
| Россия | + 0.45 | 1.80 |
| Байкальский регион | + 0.34 | 1.36 |

Примечание. *b* — коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменения температуры за десятилетие, °С/10 лет; Δ — суммарное увеличение температуры за указанный период, соответствующее линейному тренду (°С).

Таблица 2. Годы с наибольшими аномалиями температуры воздуха ($\Delta T_{\text{вх}}$), воды ($\Delta T_{\text{вд}}$) и средней скорости ветра ($\Delta W_{\text{вт}}$) за период 1991—2015 гг. (сезон май—октябрь)

| Год | $\Delta T_{\text{вх}}$, °С | Год | $\Delta T_{\text{вд}}$, °С | Год | $\Delta W_{\text{вт}}$, м/с |
|------|-----------------------------|------|-----------------------------|------|------------------------------|
| 2015 | +2.33 | 2007 | +2.44 | 2011 | -0.68 |
| 2007 | +1.99 | 2014 | +2.38 | 2008 | -0.68 |
| 2002 | +1.73 | 2012 | +1.95 | 2010 | -0.68 |
| | | 2002 | +1.76 | 2012 | -0.63 |
| | | | | 2009 | -0.61 |

Примечание. (+) положительные и (-) отрицательные аномалии.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (K) между температурой воздуха ($T_{\text{вх}}$) в районе Байкала и температурой воды в прибрежной зоне озера ($T_{\text{вд}}$) за многолетний период (сезон май—октябрь) по станциям наблюдений

| $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вд}}$ | K |
|------------------------|-----------------|------|
| Станции наблюдений | | |
| Нижнеангарск | Нижнеангарск | 0.83 |
| | Томпа | 0.71 |
| Большое Голоустное | Песчаная бухта | 0.68 |
| | Солнечная | 0.65 |
| Большой Ушканий остров | Солнечная | 0.92 |
| | Хужир | 0.88 |
| Хужир | Хужир | 0.90 |
| Бабушкин | Танхой | 0.70 |
| Хамар-Дабан | Танхой | 0.54 |
| Давша | Давша | 0.85 |
| Усть-Баргузин | Сухая | 0.79 |

логический режим водоемов (скорость и направление потока, уровень воды, водные циклы и др.). От гидрологического режима, в свою очередь, зависит эффект разбавления и концентрация веществ в воде, степень биогенной нагрузки и др. [Whitehead et al., 2009; Селезнёва и др., 2014]. В то время как меняются атмосферные осадки и гидрологический режим, возрастает вероятность возникновения таких экстремальных природных процессов, как засухи и наводнения.

Многолетние изменения суммарного количества атмосферных осадков (P), осредненных по прибрежным станциям Байкала за сезон май—октябрь, представлены на рис. 4, в. Как видно, режим осадков не был однородным. Значение линейного тренда за 1976—2015 гг. оценивается как -1.2 мм в 10 лет. В базовый период среднее значение сезонного количества осадков составило 250 мм, а за 1991—2015 гг. оно уменьшилось на 5 мм. В изменениях аномалий сезонных осадков за период 1991—2015 гг. однонаправленной тенденции не прослеживается (см. рис. 4, з), но с 2011 г. начинается нарастающий спад осадков. В 2015 г. аномалия атмосферных осадков отрицательная и наибольшая за анализируемый период (рис. 4, з), а количество выпавших осадков составило 52 % нормы.

Солнечная радиация. Солнечное излучение является важным источником энергии для фотосинтезирующих водорослей. Закономерности изменения солнечной радиации, достигающей земной поверхности, существенно зависят от особенностей изменения облачности и прозрачности атмосферы, определяемой вариацией ее газового и аэрозольного состава. Основной особенностью многолетних изменений приходящей радиации на территории России является ее пониженное поступление (предположительно, обусловленное воздействием крупных вулканических извержений) в 1980-е — начале 1990-х гг. [Доклад..., 2016]. Однако уже в последнее десятилетие XX столетия произошел возврат к значениям приходящей радиации, близким к норме. В начале XXI в. изменения в приходящей радиации не столь однозначны. Так, например, на территории европейской части России наблюдается сохранение положительной тенденции, а в Приамурье и Приморье отмечается тенденция к снижению приходящей радиации [Доклад..., 2016].

Данные об аномалиях годовых сумм прямой радиации на интервале 1961—2015 гг. (рис. 5). [Доклад..., 2016] показали, что на территории Байкальского региона в 1980-е гг. поступление радиации было также пониженным. Но в начале 1990-х гг. колебания прямой радиации стабилизировались, ее значения стали близки к норме. Стабильность в приходе прямой солнечной радиации на территорию Байкальского региона сохраняется и в XXI в. Размах ее колебаний находится в пределах ± 10 % от нормы.

Изменения температуры воздуха и воды, скорости ветра внутри сезона (май—октябрь). Изменения среднемесячных значений температуры воздуха в районе Байкала и воды в прибрежной зоне озера за многолетний период (рис. 6) показывают, что самыми теплыми месяцами в течение сезона май—октябрь являются июль и август. В начале сезона температура воздуха повышается быстрее, чем температура воды, достигая наибольшего значения в июле. Прибрежные воды озера нагреваются медленнее, и их наибольшая температура отмечается в августе. Среднемесячные значения температуры воздуха и воды в августе близки по величине. В последующие месяцы происходит более быстрое охлаждение воздуха, чем охлаждение прибрежных вод. За многолетний период наиболее слабые скорости ветра в рассматриваемом сезоне отмечаются в июне—августе, а самым спокойным является июль (см.

0.12 м/с каждые 10 лет. За базовый период ее среднее значение составило 2.4 м/с, а в 1991—2016 гг. оно уменьшилось до 2.1 м/с, т.е. средняя скорость ветра на Байкале в летнее время уменьшилась на 12.5 %. Аномалии средней сезонной скорости ветра ($\Delta W_{\text{вт}}$) в 1991—2016 гг. имеют отрицательный знак (см. рис. 4, в). Наиболее слабыми ветровыми потоками за весь период наблюдений отличается последнее десятилетие, особенно 2005—2014 гг., а пик пришелся на 2008—2012 гг. (см. рис. 4, в, табл. 2). В последние 2015—2016 гг. скорость ветра немного увеличилась, но аномалии также отрицательные.

Атмосферные осадки. В условиях меняющегося климата к числу факторов, влияющих на появление признаков эвтрофикации в водоемах и на ее ход, относятся атмосферные осадки. Изменение их режима и интенсивности влияет в первую очередь на гидро-

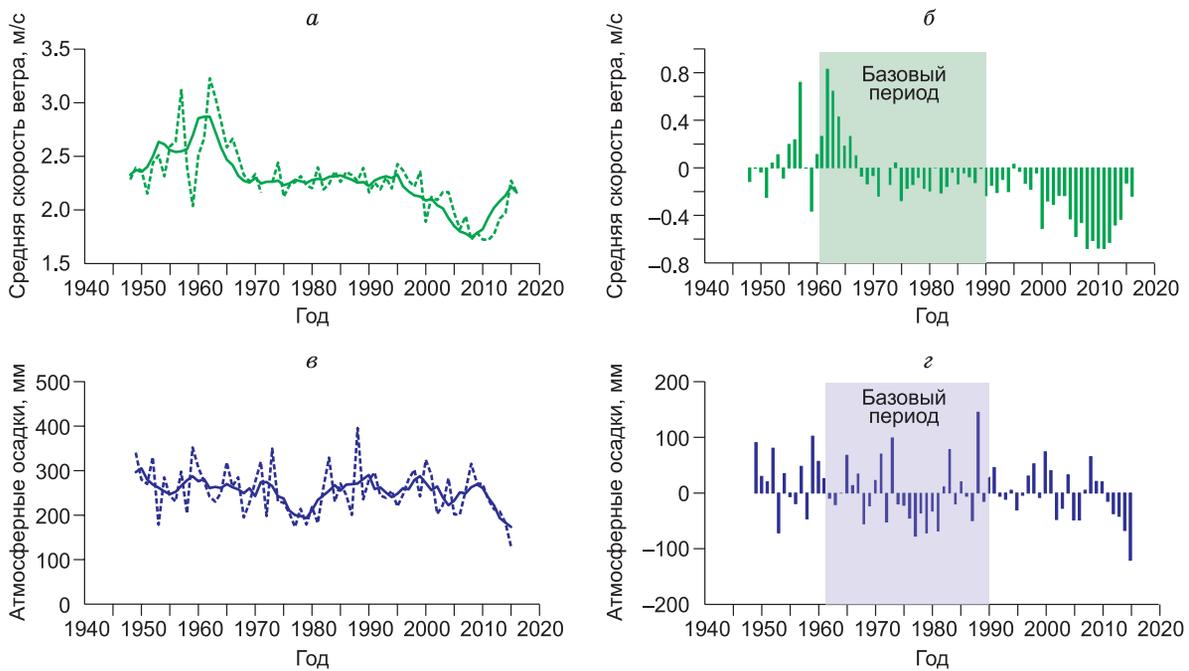


Рис. 4. Многолетние изменения средней скорости ветра и суммарного количества атмосферных осадков в районе Байкала и их аномалии.

Изменения средней скорости ветра (а) и суммарного количества атмосферных осадков (в) в мае—октябре, сплошная линия — пятнадцатилетние скользящие осреднения. Аномалии средней сезонной (май—октябрь) скорости ветра (б) и суммарного количества атмосферных осадков (з).

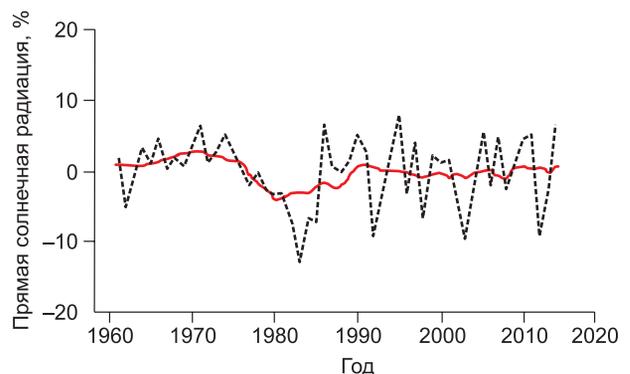
рис. 6). Таким образом, наиболее благоприятные условия для развития негативных процессов в береговой зоне Байкала создаются преимущественно в июле—августе.

Взаимосвязь между изменениями климатических и биологических параметров в береговой зоне Байкала. В начале XXI в. сложившиеся природные условия способствовали появлению в береговой зоне озера негативных экологических процессов (вспышки массового развития водорослей и водной растительности, гниение их остатков на дне и берегах, сдвиг в зональности, обилие бентоса и т.д.) [Кравцова и др., 2012; Kravtsova et al., 2014; Timoshkin et al., 2016; Белых и др., 2015а, б]. Мы считаем, что климатические параметры могут спровоцировать следующие изменения в биосистеме оз. Байкал.

Изменение температуры. Между температурой воздуха в районе Байкала и температурой воды в его прибрежной зоне существует тесная связь, коэффициенты корреляции варьируют от 0.65 до 0.92. Тренды увеличения годовой и сезонной температуры приводят к сокращению сроков ледостава на Байкале. Так, например, продолжительность ледового покрова озера сократилась на 18 дней в XX в. [Шимараев и др., 2002], и, как результат, увеличился вегетационный период. С другой стороны, потепление приводит к усилению тепловой стратификации, и поэтому фитопланктон может больше времени находиться на глубине оптимальной освещенности. Хорошо известно, что повышение температуры воды влияет на темпы роста цианобактерий, способствует увеличению внутренней биогенной нагрузки, которая может обеспечивать благоприятные условия для размножения цианобактерий, приводит к изменению физико-химических характеристик водной среды (вязкость воды, величина диффузии и др.), снижению способности самоочищения водо-

Рис. 5. Аномалии (в процентах от «нормы» — среднего за 1961—1990 гг.) годовых сумм прямой солнечной радиации, осредненные для Байкальского региона [Доклад..., 2016].

Красная линия — одиннадцатилетние скользящие осреднения.



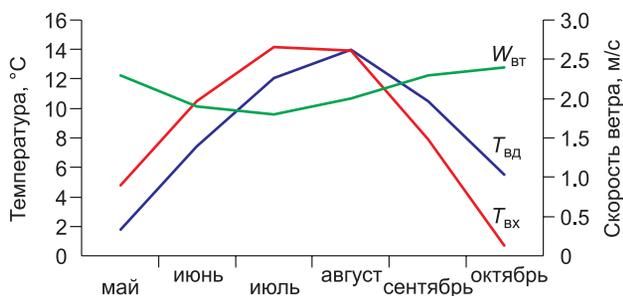


Рис. 6. Изменения среднемесячной температуры воздуха ($T_{вх}$) и воды ($T_{вд}$), среднемесячной скорости ветра ($W_{вт}$) в сезон май—октябрь за многолетний период.

емов [Hammond, Pryce, 2007; Ihnkena et al., 2010; Posch et al., 2012; O’Neil J.M. et al., 2012; Valdemarsen et al., 2015]. Существует тесная связь между температурой воды и концентрацией хлорофилла в оз. Байкал, как и в других водоемах [Straškrábová et al., 2005; Заворуев и др., 2008; Селезнева и др., 2014; Зайцева 2014; Shimaraeva et al., 2017]. Рис. 7 показывает, что в периоды хорошо прогретой воды (лето) продуктивность фитопланктона (хлорофилла «а») высокая, и наоборот весной и осенью.

Спектральный анализ распределения интенсивности прогрева атмосферы и воды в целом показывает, что с 1990-х годов климат становится более нестабильным (рис. 8). С этого периода начинают преобладать изменения с периодичностью в 2—4 года. Возможно, такие частые температурные перепады оказали неблагоприятное воздействие на жизненные циклы некоторых фотосинтетиков Байкала, что способствовало занятию освободившейся экологической ниши другими видами.

Скорость ветра. Повышение температуры, уменьшение скорости ветра и увеличение часов солнечного сияния привели в последние два десятка лет к интенсификации «цветения» воды на оз. Тайху (Китай) [Zhang et al., 2012]. Уменьшение средней скорости ветра, снижение активности и интенсивности ветровых потоков на фоне повышения температуры наблюдается в Байкальском регионе. Наиболее ярко этот процесс проявился в регионе в XXI в. с максимумом в интервале 2008—2012 гг. Мы предполагаем, что ослабление ветровой активности приводит к уменьшению интенсивности переотложения «мертвого» органического вещества из прибрежной зоны на берег, в результате кислородные условия у дна могут измениться на анаэробные. С другой стороны, токсичные цианобактерии почти не потребляются хищниками, следовательно, контроль их численности определяется временем нахождения в фотической зоне. А при пониженной активности и интенсивности ветровых потоков это время увеличивается.

Сочетание климатических факторов и усиливающейся антропогенной нагрузки на побережье и береговую зону Байкала (интенсивное развитие туризма и рекреации, увеличение поселений на побережье и потока туристов при отсутствии или некачественной работе очистных сооружений и др.) способствуют яркому проявлению процессов эвтрофикации в береговой зоне вблизи населенных пунктов, которые оказывают локальное негативное воздействие на экосистему озера. Появление негативных процессов в береговой зоне, где нет антропогенного влияния, объясняется как переносом системой волнений и течений обломков водорослей и высшей водной растительности, загрязняющих веществ и др. из локальных эвтрофированных районов, так и действием климатических факторов.

Согласно прогнозам [IPCC..., 2015], глобальная температура воздуха до конца XXI в. будет продолжать увеличиваться. Следовательно, температура воздуха в Байкальском регионе и температура

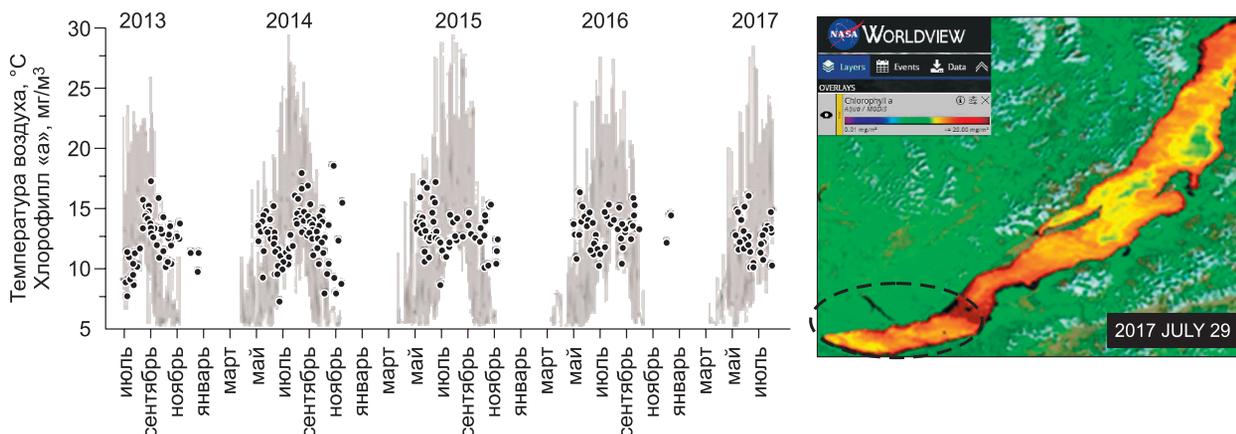


Рис. 7. Распределение (рисунок слева) температуры воздуха (серая линия) и хлорофилла «а» (черные точки) в Южном Байкале (штриховая линия на рисунке справа).

Концентрация хлорофилла «а» в приповерхностном слое в оз. Байкал получена на основе спутниковых данных MODIS-Aqua.

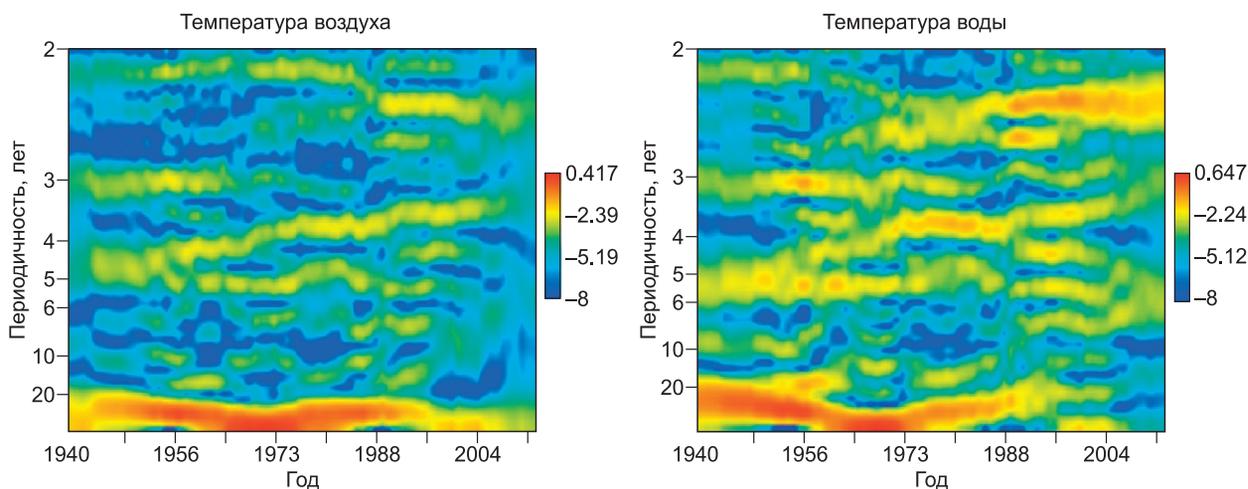


Рис. 8. Вейвлет-диаграмма периодичности изменчивости температуры воздуха в районе Байкала и воды в прибрежной зоне озера.

воды в прибрежной зоне Байкала будут повышаться. Скорость ветра в Байкальском регионе к 2050 г. будет уменьшаться, согласно моделям ее прогнозирования [Eichelberger et al., 2008]. Принимая во внимание эти прогнозы и установленные нами тенденции климатических переменных можно ожидать, что влияние климата на экологические процессы береговой зоны озера будет расти. Но есть надежда, что вклад антропогенного фактора будет уменьшаться за счет ряда мероприятий (строительство и модернизация очистных сооружений, рациональное регулирование туризма, рекреационного строительства и др.), направленных на сохранение озера и улучшение состояния окружающей среды в Байкальском регионе. Поэтому важно в дальнейших исследованиях сопоставить и оценить вклад каждого фактора — климатического и антропогенного в происходящие в береговой зоне процессы для своевременного выявления, анализа экологических изменений и принятия мер по улучшению экологического состояния озера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные исследования, модели, прогнозы показывают, что ситуация с воздействием климата на водные экосистемы сохранится, особенно, когда имеются высокая температура воздуха и воды, уменьшение осадков, ослабление ветровых потоков, продолжительное солнечное сияние. Тогда риски эвтрофирования водоемов увеличиваются, даже если внешние источники питательных (загрязняющих) веществ становятся стабильными.

В Байкальском регионе наибольшие аномалии климатических переменных (температуры воздуха и воды, скорости ветра, атмосферных осадков) в теплый период пришлось на XXI столетие. Климатические условия последнего десятилетия отличались наиболее благоприятными для появления в береговой зоне оз. Байкал негативных экологических процессов (вспышек массового развития водорослей и водной растительности, гниение их остатков на дне и берегах, изменение в структуре и зональности биоценозов и т.д.). Повышение температуры воздуха и воды, уменьшение количества осадков, притока речных вод в Байкал, понижение уровня воды озера, маловодный период [Государственный доклад, 2016], ослабление ветровых потоков и снижение динамики водных масс, водообменных процессов и, следовательно, самоочищения — это основные природные факторы, которые способствовали появлению негативных процессов в озере.

В период продолжающегося глобального потепления экологические процессы в береговой зоне Байкала без сомнения требуют особого внимания и долгосрочного мониторинга для более глубокого понимания реакции экосистемы озера на изменение климата и выявления механизмов ее функционирования в современных и будущих условиях.

Мониторинг, связанный с влиянием на экосистему Байкала в связи с изменениями природных климатических условий, следует совместить с работами (мониторингом) в районах крупных населенных пунктов с целью определения влияния антропогенной нагрузки на процессы эвтрофикации прибрежных районов Байкала, ухудшающих экологическое состояние водной среды. Совместное проведение таких работ покажет соотношение влияния природных и антропогенных источников на экологическую обстановку в прибрежных районах Байкала — объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО.

Работа выполнена в рамках программы ФАНО 0345–2016–0006.

ЛИТЕРАТУРА

Белых О.И., Гладких А.С., Тихонова И.В., Кузьмин А.В., Могильникова Т.А., Федорова Г.А., Сороковикова Е.Г. Идентификация цианобактерий продуцентов паралитических токсинов моллюсков в озере Байкал и водохранилищах реки Ангары // *Микробиология*, 2015а, № 84(1), с. 120–122.

Белых О.И., Гладких А.С., Сороковикова Е.Г., Тихонова И.В., Потапов С.А., Бутина Т.В. Сакситоксин-продуцирующие цианобактерии в озере Байкал // *Сибирский экологический журнал*, 2015б, № 2, с. 231–239.

Бондаренко Н.А., Логачева Н.Ф. Структурные изменения в фитопланктоне прибрежной зоны озера Байкал // *Гидробиологический журнал*, 2016, т. 52, № 6, с. 17–26.

Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия // *Труды ГГО*, 2013, вып. 568, с. 156–172.

Государственный доклад. О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2015 году. Иркутск, ИНЦХТ, 2016, 372 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. М., Росгидромет, 2016, 68 с.

Заворуев В.В., Домышева В.М., Шимараев М.Н., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Пространственное распределение флуоресцентных характеристик фитопланктона в период формирования весенней гомотермии в оз. Байкал // *Оптика атмосферы и океана*, 2008, т. 21, № 5, с. 377–380.

Зайцева Н.В. Проблема развития синезеленых водорослей в Воткинском и Ижевском водохранилищах // *Современные научные исследования и инновации*, 2014, № 6 [Электронный ресурс]. — URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/36048>.

Зилов Е.А. Между процветанием и катастрофой // *Российская газета* — Федеральный выпуск, 13 апреля 2016, № 6946 (78).

Зилов Е. А., Крашук С.Л., Онучин К.А., Пислегина Е.В., Русановская О.О., Шимараева С.В. Результаты 70-летних гидробиологических наблюдений планктона озера Байкал // *Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум)*. Сборник научных трудов конференции. СПб., Изд-во «Лема», 2016, с. 157–160.

Ицкович В.Б., Шигарова А.М., Глызина О.Ю., Калюжная О.В., Боровский Г.Б. Изменение содержания БТШ70 у байкальской эндемичной губки *Lubomirskia Baicalensis* в процессе обесцвечивания и в условиях гипертермии // *Актуальные проблемы науки Прибайкалья*. Вып. 1. / Под ред. И.В. Бычкова, А.Л. Казакова. Иркутск, Изд-во Ин-та географии, 2015, с. 135–138.

Калюжная О.В., Ицкович В.Б. Влияние обесцвечивания байкальской губки на таксономический состав симбиотических микроорганизмов // *Генетика*, 2015, т. 51, № 11, с. 1335–1340.

Кравцова Л.С., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В., Помазкина Г.В., Домышева В.М., Кравченко О.С., Грачев М.А. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал // *ДАН*, 2012, т. 447(2), с. 227–229.

Мещерская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // *Метеорология и гидрология*, 2006, № 9, с. 46–58.

Сакирко М.В., Домышева В.М., Ходжер Т.В. Современные данные о химическом составе воды озера Байкал // *Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум)*. Сборник научных трудов конференции. СПб., Изд-во «Лема», 2016, с. 351–355.

Селезнева А.В., Селезнев В.А., Беспалова К.В. Массовое развитие водорослей на водохранилищах р. Волги в условиях маловодья // *Поволжский экологический журнал*, 2014, № 1, с. 88–96.

Тимошкин О.А., Мальник В.В., Сакирко М.В., Боедекер К. Экологический кризис на Байкале: ученые ставят диагноз // *Наука из первых рук*, 2014, № 5(59), с. 74–91.

Томберг И.В., Сакирко М.В., Домышева В.М., Сезько Н.П., Лопатина И.Н., Башенхаева Н.В., Филевич Е.А., Куликова Н.Н., Попова О.В., Мальник В.В., Лухнев А.Г., Зайцева Е.П., Потапская Н.В., Зверева Ю.М., Тимошкин О.А. Первые сведения о химическом составе интерстициальных вод заплесковой зоны озера Байкал // *Известия ИГУ. Серия Биология. Экология*, 2012, т. 5, № 3, с. 64–74.

Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии // *ДАН*, 2002, т. 383, № 3, с. 397–400.

Var-Yosef Y., Sukenik A., Hadas O., Viner-Mozzini Y., Kaplan A. Enslavement in the water body by toxic *Aphanizomenon ovalisporum*, inducing alkaline phosphatase in phytoplanktons // *Curr. Biol.*, 2010, № 20, September 14, p. 1557–1561.

Cohen A.S., Gergurich E.L., Kraemer B.M., McGlue M.M., McIntyre P.B., Russell J.M., Simmons J.D., Swarzenski P.W. Climate warming reduces fish production and benthic habitat in Lake Tanganyika, one of the most biodiverse freshwater ecosystems // *PNAS*, 2016, № 113 (34), p. 9563—9568.

Coumou D., Lehmann J., Beckmann J. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes // *Science*, 2015, v. 348, № 6232, p. 324—327.

Eichelberger S., Mccaa J., Nijssen B., Wood A. Climate change effects on wind speed // *North American Wind Power*, 2008, available online: www.nawindpower.com.

Hallegraeff G.M. A review of harmful algal blooms and their apparent increase // *Phycologia*, 1993, № 32, p. 79—99.

Hammond D., Pryce A.R. Climate change impacts and water temperature // Environment Agency Science Report SC060017/SR, Environment Agency: Bristol, UK, 2007.

Ihnkena S., Eggertb A., Beardalla J. Exposure times in rapid light curves affect photosynthetic parameters in algae // *Aquat. Bot.*, 2010, № 93, p. 185—194.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Eds. R.K. Pachauri and L.A. Meyer), 2015, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Izmest'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E., Ferwerda C.J., Gray D.K., Woo K.H., Pislegina H.V., Krashchuk L.S., Shimaraeva S.V., Silow E.A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // *J. Great Lakes Res.*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.00>.

Kravtsova L.S., Izhboldina L.A., Khanaev I.V., Pomazkina G.V., Rodionova E.V., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V., Kostornova T.Ya., Kravchenko O.S., Kupchinsky A.B. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // *J. Great Lakes Res.*, 2014, № 40, p. 441—448.

Le C., Zha Y., Li Y., Sun D., Lu H., Yin B. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control // *Environ. Manag.*, 2010, № 45, p. 662—668.

Mao J.Q., Chen Q., Chen Y.C. Three-dimensional eutrophication model and application to Taihu Lake, China // *J. Environ. Sci.*, 2008, № 20, p. 278—284.

Moss B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R.W., Jeppesen E., Mazzeo N., Havens K., Lacerot G., Liu Z., De Meester D., Paerl H., Scheffer M. Allied attack: Climate change and eutrophication // *Inland Waters*, 2011, № 1, p. 101—105.

O'Neil J.M., Davis T.W., Burford M.A., Gobler C.J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change // *Harmful Algae*, 2012, № 14, p. 313—334.

Paerl H.W., Paul V.J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria // *Water Res.*, 2012, № 46, p. 1349—1363.

Paerl H.W., Otten T.G. Blooms bite the hand that feeds them // *Science*, 2013, № 342, p. 433—434.

Posch T., Köster O., Salcher M. M., Pernthaler J. Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming // *Nat. Clim. Change*, 2012, № 2, p. 809—813.

Qin B.Q., Zhu G.W., Gao G., Zhang Y.L., Li W., Hans P., Carmichael W.W. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management // *Environ. Manag.*, 2010, № 45, p. 105—112.

Schindler D.W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication // *Limnol. Oceanogr.*, 2006, № 51, p. 356—363.

Shimaraeva S.V., Pislegina E. V., Krashchuk L. S., Shchapov K. S., Silow E.A. Dynamics of chlorophyll A concentration in the South Baikal pelagic during the direct temperature stratification period // *Inland Water Biol.*, 2017, v. 10, № 1, p. 59—63.

Straškrábová V. Primary production and microbial activity in the euphotic zone of Lake Baikal (Southern Basin) during late winter // *Global Planet. Change*, 2005, v. 46, p. 57—73.

Su J.Q., Wang H., Yang Z.F. Lake eutrophication modeling in considering climatic factors change: A review, China // *J. Appl. Ecol.*, 2012, № 23, p. 3197—3206.

Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V., Belykh O.I., Malnik V.V., Sakirko M.V., Shirokaya A.A., Bondarenko N.A., Domysheva V.M., Fedorova G.A., Kochetkov A.I., Kuzmin A.V., Likhnev A.G., Medvezhonkova O.V., Nepokrytykh A.V., Pasynkova E.M., Poberezhnaya A.E., Potapskaya N.V., Rozhkova N.A., Sheveleva N.G., Tikhonova I.V., Timoshkina E.M., Tomberg I.V., Volkova E.A., Zaitseva E.P., Zvereva Yu.M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // *J. Great Lakes Res.*, 2016, available online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.

Valdemarsen T., Quintana C.O., Flindt M.R., Kristensen E. Organic N and P in eutrophic fjord Sediments — rates of mineralization and consequences for internal nutrient loading // *Biogeosciences*, 2015, № 12, p. 1765–1779.

Whitehead P.G., Wilby R.L., Battarbee R.W. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality // *Hydrol. Sci. J.*, 2009, № 54, p. 101–123.

Xia R., Zhang Y., Critto A., Wu J., Fan J., Zheng Z., Zhang Y. The potential impacts of climate change factors on freshwater eutrophication: Implications for research and countermeasures of water management in China // *Sustainability*, v. 8, p. 229. doi: 10.3390/su 8030229.

Zhang M., Duan H.T., Shi X.L., Yu Y., Kong F.X. Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: Implications for future climate change // *Water Res.*, 2012, № 46, p. 442—452.

Рекомендована к печати 17 октября 2017 г.

М.И. Кузьминым

Поступила в редакцию 18 апреля 2017 г.

после доработки — 18 сентября 2017 г.