

УДК 04-130 05-732, 04-170 05-730

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕР ОАЗИСОВ ХОЛМОВ ЛАРСЕМАНА И ШИРМАХЕРА (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)**¹Нигаматзянова Г.Р., ^{2,3}Федорова И.В.**¹ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань,
e-mail: gulnaraniga@mail.ru;²ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
Санкт-Петербург, e-mail: i.fedorova@otto.nw.ru;³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

В работе представлены результаты оценки современного экологического состояния четырех репрезентативных пресноводных водоемов оазисов Холмы Ларсеманн и Ширмахера (Восточная Антарктида) на основе гидрологических и гидробиологических показателей. Гидрохимические показатели озер имеют довольно большой диапазон и изменяются в течение летнего сезона. Фосфор является основным биогенным элементом, лимитирующим первичную продукцию в водоемах. Согласно полученным данным, исследованные озера относятся к олиготрофному типу по трофности и качеству вод, характеризуются различными экологическими показателями, обладают высокой степенью самоочищающей способности как благодаря наличию большого объема воды, так и за счет высокой фильтрационной активности зоопланктона. Однако рассмотренные водоемы характеризуются низкими показателями устойчивости к изменениям параметров окружающей среды.

Ключевые слова: гидробиология, гидрология, водные экосистемы, антарктические оазисы**ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE LARSEMANN HILLS AND THE SHIRMACHER OASES LAKES (EAST ANTARCTICA)****¹Nigamatzyanova G.R., ^{2,3}Fedorova I.V.**¹Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, e-mail: gulnaraniga@mail.ru;²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, e-mail: i.fedorova@otto.nw.ru;³Saint Petersburg State University, St. Petersburg

The article presents the results of a current ecological status estimation of four representative freshwater lakes of The Larsemann Hills and The Schirmacher Oases (East Antarctica) based on hydrologic and hydro-biological indicators. Hydrochemical indicators of lakes have a large range and change during a summer season. Phosphorus is a key nutrient element limiting primary production in water body. According to received data, investigated lakes belong to the oligotrophic type of trophic status and water quality. They have a high ability of a self-cleaning according to both a huge water volume and zooplankton high filtration activity. Considered lakes are characterized by low resistance for environmental parameter changes.

Keywords: hydrobiology, hydrology, aquatic ecosystems, Antarctic oases

В связи с труднодоступностью антарктических водных объектов большая часть из них до сих пор остается малоизученной. Так как водоемы антарктических оазисов являются достаточно хрупкими экосистемами, резко реагирующими на изменения окружающей среды [10], встаёт вопрос об оценке их современного состояния, изучении их устойчивости к климатическим и антропогенным воздействиям и прогнозировании дальнейшей направленности развития водных экосистем. С 2006 г. в летний сезон проводится мониторинг репрезентативных озер оазисов Ширмахера и Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). Характеристика современного экологического состояния пресноводных водоемов оазисов была выполнена на основе изучения гидробиологического разнообразия, моделирования водных экосистем и оценки влияния гидрологических факто-

ров на структурные и количественные показатели зоопланктонного сообщества; были выполнены расчеты лимитации продукции органического вещества содержанием биогенных элементов, подсчитаны индексы видового разнообразия (Шеннона – Уивера), рассчитана скорость фильтрации зоопланктоном для оценки самоочищения озер. В качестве репрезентативных объектов выбраны 4 водоема: озера Прогресс и Степпед (оазис Холмы Ларсеманн) и озера Верхнее и Водоросли (оазис Ширмахера), характеризующиеся различными морфометрическими и гидробиологическими свойствами, а также имеющие различную степень антропогенной нагрузки. Для исследований были использованы данные измерений, выполненных в летний сезон 2006–2007 гг. (52-я Российская антарктическая экспедиция (РАЭ)) в оазисе Ширмахера, летом 2011–2012 гг. (57-я РАЭ), 2012–2013 гг.

(58-я РАЭ) и 2014–2015 гг. (60-я РАЭ) в оазисе Холмы Ларсеманн.

Материалы и методы исследования

Исследуемые водные объекты расположены на территории оазисов Восточной Антарктиды. Озера Прогресс и Степпед оазиса Холмы Ларсеманн (координаты озера 69°24'4.52» ю.ш., 76°23'15.62» в.д. и 69°22'32.81» ю.ш., 76°23'8.94» в.д. соответственно) были выбраны как репрезентативные в связи с использованием воды из озера Прогресс в качестве питьевой на полярных станциях оазиса и наличия непосредственного антропогенного влияния на оз. Степпед, расположенного поблизости с российской полярной станцией «Прогресс» и китайской – Zhongshan. Приледниковое оз. Прогресс имеет максимальную глубину 34 м, площадь поверхности 0,158 км² и гомотермию почти круглый год. Глубина озера Степпед чуть более 5 м, площадь поверхности 0,005 км², вода прогревается за летние месяцы до +8–9°С [9]. Оазис Ширмахера, отделенный от моря на 80–100 км шельфовым ледником, характеризуется континентальным генезисом большинства озерных вод с влиянием талого стока с ледника в летний период. Озера Верхнее и Водоросли (координаты 70°77'63,71 ю.ш., 11°80'99,21 в.д. и 70°77'18,67 ю.ш., 11°78'52,83 в.д. соответственно) данного оазиса отличаются обратной термической стратификацией большую часть года. Максимальная глубина озера Водоросли – 2 м, площадь озера – 0,046 км²; дно сложено валунами и песком. Озеро Верхнее имеет каменистое дно, максимальная глубина озера 7,7 м, площадь озера – 0,042 км².

Экологическое состояние озер было оценено на основе нескольких методов:

1. Оценка самоочищения водной экосистемы по отношению деструкции к валовой первичной продукции органического вещества [2].
2. Оценка количественных показателей зоопланктона и расчет на их основе индекса видового разнообразия Шеннона-Уивера [11].
3. Определение трофического статуса озер по гидрологическим и гидробиологическим показателям [2].
4. Анализ гидрохимических показателей озер, включая содержание биогенных элементов и оценка лимитации содержанием биогенных элементов в воде продуцирования органического вещества фитопланктоном озер [2].
5. Оценка устойчивости озёрной экосистемы к изменению параметров естественного и антропогенного режимов на основе индексно-балльного метода [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения оценки самоочищения водных экосистем оазиса Холмы Ларсеманн применялся метод отношения деструкции (D) органического вещества к валовой первичной продукции ($P_{\text{вал}}$), которые рассчитывались согласно методике Дмитриева В.В. [2]. Согласно полученным расчетам в озере Прогресс $P_{\text{вал}}$ составляет 0,003 мгС/м²; деструкция – 0,024 мгС/м². Их отношение $D/P_{\text{вал}}$ равно 7,1, указывает на высокие способности водоема к самоочищению. В озере Степпед первичная продукция намного

(почти в 600 раз) выше, что объясняется малыми глубинами водоема, хорошим прогревом воды и наличием достаточного количества биогенных элементов ввиду близкого расположения полярной станции и, соответственно, антропогенной нагрузки на водоем. Это создает оптимальные условия для развития фитопланктона. Для оз. Степпед $P_{\text{вал}} = 0,036$ мгС/м², $D = 1,542$ мгС/м². Согласно выполненным расчетам, самоочищающая способность озера Степпед ниже, чем озера Прогресс, т.к. $D/P_{\text{вал}}$ – отношение равно 4,3. Для озера Верхнее и Водоросли оазиса Ширмахера была использована кислородная модификация скляночного метода определения первичной продукции на разных глубинах [2]. Для озера Водоросли $P_{\text{вал}} = 0,04$ мгС/м² (среднее значение), $D = 0,131$, $D/P_{\text{вал}}$ – отношение составило 3,3. В оз. Верхнее первичная продукция низкая – $P_{\text{вал}} = 0,002$ мгС/м², деструкция $D = 0,028$ мгС/м², $D/P_{\text{вал}} = 9,3$. Соотношение $D/P_{\text{вал}} > 1$, что свидетельствует о высокой самоочищающей способности водоемов. По показателям первичной продукции (по классификации Likens, 1975) [2] все исследуемые водоемы относятся к олиготрофному типу.

Согласно данным обработки гидробиологических образцов в зоопланктоне оз. Прогресс по численности преобладают коловратки, в основном эндемик Антарктиды *Philodina gregaria* (Muntau, 1910), среднее значение численности озера 179 экз./м³; биомассу определяют ветвистоусые ракообразные, среднее значение биомассы зоопланктона 1,3 мг/м³. В оз. Степпед численность и биомасса определяется крупными эндемичными рачками *Daphnia studei* (Ruhe, 1914), средние показатели численности 2729 экз./м³ и 814,17 мг/м³. Как и в случае с первичной продукцией, количественные показатели зоопланктонных сообществ оз. Степпед много выше по сравнению с оз. Прогресс, что можно объяснить благоприятными условиями, которые устанавливаются в летние месяцы на мелководном водоеме. По количественным показателям зоопланктона был рассчитан индекс видового разнообразия Шеннона-Уивера, значения которого в среднем составили для оз. Прогресс 1,46 (по численности), для оз. Степпед – 0,94 (по численности). Данные показатели весьма низки и характеризуют исследуемые водоемы как загрязненные, что можно объяснить функциональной зависимостью между индексом и числом видов в сообществе озера [8], т.к. исследуемые сообщества имеют

достаточно низкое видовое разнообразие с выраженной степенью доминирования отдельных видов [1].

На основе данных по биомассе зоопланктона была определена *трофность озер* оазиса Холмы Ларсеманн по *фильтрационной активности (ФА)* зоопланктона. Так, фильтрационная активность зоопланктона оз. Прогресс в среднем составила $0,00003 \text{ сут.}^{-1}$, в оз. Степпед – $0,23 \text{ сут.}^{-1}$. Скорость фильтрации в оз. Степпед выше, чем в оз. Прогресс, что, очевидно, связано в целом с большей продуктивностью водоема. Время осветления воды зоопланктоном $T = 1/ФА$ для озера Прогресс составляет порядка 146 лет (при оптимальной температуре водоема 5°C), а для озера Степпед – 15 дней (при оптимальной температуре воды 10°C).

Гидрохимическая характеристика озер. Минерализация водоемов оазиса Холмы Ларсеманн варьируется от 11 до 970 мг/л, но вода озер может быть солоноватой – до 1500 мг/л. Значительная соленость озер в летний период объясняется малым поступлением талой воды из-за отсутствия снежников на водосборах и, соответственно, слабым разбавлением солей. Минерализация озер оазиса Ширахера, по большей части, меньше 500 мг/л. Однако в некоторых водоемах происходит возрастание минерализации в летний сезон более 1000 мг/л в связи с разбавлением солей, находящихся на дне озерных ванн [7]. Для оценки качества вод и состояния экосистемы очень важно определить содержание биогенных, лимитирующих первичную продукцию элементов в воде и растворенного кислорода. В табл. 1 и 2 приведены значения некоторых гидро-

химических показателей для рассматриваемых озер оазиса Ширахера и Холмы Ларсеманн.

Согласно данным 60-й РАЭ [5], содержание растворенного кислорода в среднем составляет 9,3 мг/л по сравнению со средним значением для 2012 года – 10,8 г/л. Содержание кремния варьируется от 16,98 мг/л в оз. Степпед до 24,55 мг/л в оз. Прогресс. Достаточно низкое содержание минерального фосфора может указывать на то, что данный элемент является лимитирующим в экосистеме данных водоемов. По более ранним исследованиям [7], водоемы оазиса относятся к хлоридно-натриевым III типа, минерализация меняется от 10 до 2000 мг/л [4], большинство водоемов имеют нейтральную или слабокислую среду. Отличаются значения нитратов в озерах. Так, в 2012 году содержание $N-NO_3$ в оз. Прогресс не превышало 0,06 мг/л, а в 2015 г. – 0,11 мг/л. Для оз. Степпед характерны большие различия: для 2012 года отмечена концентрация 0,58 мг/л, для 2015 года это значение было 0,14 мг/л. Различна и концентрация железа в воде озер: для приледникового оз. Прогресс оно составило 1,9 мкг/л, для оз. Степпед – 36,2 мкг/л.

Согласно полученным гидрохимическим характеристикам и критериям оценки трофности по литературным источникам [2], озера Прогресс и Степпед по концентрации фосфора и нитритного азота являются олиготрофными. По концентрации растворенного кислорода в % насыщения озера также являются олиготрофными.

Таблица 1

Гидрохимические показатели озер оазиса Холмы Ларсеманн

№ п/п	Озера	Дата отбора	Концентрация								
			мг/л								мкг/л
			O ₂ , мг./л	Si-SiO ₃ »	P-PO ₄ '''	N-NO ₃ '	N-NO ₂ '	N-NH ₄ '	Рорг	Норг	Fe ⁺³ +Fe ⁺²
Данные 57-й и 58-й РАЭ											
1	Прогресс	15.01.12	10,3			0,06*					
2	Степпед	16.01.12	11,3			0,58*					
	Данные 60-й РАЭ										
1	Прогресс	05.02.15	9	24,55	0,05	0,11	0,03	0,51	0,1	11,23	1,9
2	Степпед	05.02.15	9,5	16,98	0,05	0,14	0	0,53	0,2	22,47	36,2

Примечание. * Данные 58-й РАЭ получены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Ресурсный Образовательный Центр по направлению «химия».

Таблица 2

Гидрохимические и температурные характеристики озёр оазиса Ширмахера

Название озера	Дата экспресс-анализа	Глубина отбора пробы, м	Минерализация, мг/л	Температура воды, °C	pH	Содержание кислорода	
						мг/л	% нас.
Оз. Верхнее, измерения со льда толщиной 1,3 м	02.12.06	0	043	0,4	7,5		
		3,5	052	4,0	7,4		
		7,5	081	4,7	7,4		
	03.12.06	0		0,2		13,84	
		3,5		4,9		16,67	
		7,7		5,5		15,15	
Оз. Водоросли, измерения со льда толщиной 0,9 м	04.12.06	0	117	0,2	7,6	14,13	96
		2	628	4,7	7,4	14,62	
	06.12.06*	0	505	4,7	7,1	17,96	147
		1	249	1,1	6,9	16,66	117
	03.01.07**	Пов.	290	7,2	6,9	3,17	34

Примечания. *Измерения с пробуренной в предыдущий день лунки, **измерения с поверхности освободившегося ото льда озера.

Как видно из табл. 2, содержание кислорода по глубине озёр Верхнее и Водоросли примерно одинаковое. Заметно увеличение содержания кислорода на дне оз. Верхнее. Это, скорее всего, связано с наличием водорослей на дне водоема, которые в процессе фотосинтеза выделяют кислород, обогащая придонные слои. Значение минерализации в оз. Водоросли, выше, чем в оз. Верхнее, что можно объяснить разницей источников питания: для оз. Верхнее основным приходным элементом водного баланса является талая вода примыкающего к леднику снежника, для оз. Водоросли – снежник на водосборе озера, воды которого при таянии и поступлении в озеро обогащаются солями. Наличие большей концентрации солей подо льдом по сравнению с придонными слоями объясняется вымораживанием солей в зимний период при формировании льда. Однако для оз. Водоросли в первый день измерений минерализация была больше именно в придонном слое из-за более активных окислительно-восстановительных реакций с грунтом. Значение pH характеризует водоемы как нейтральные и слабощелочные. Для озёр оазиса Ширмахера характерна обратная стратификация подо льдом. Однако после вскрытия льда в озерах происходит смена стратификации, температура воды на поверхности повышается. Так, для оз. Водоросли она возросла до 7,2 °C. По гидрохимическому типу озера Водоросли и Верхнее относятся к хлоридно-натриевым, очень мягким. Вода оз. Верхнее ультрапресная и с относительно повышенной

минерализацией по сравнению с оз. Водоросли, где сумма ионов достигает 628 мг/л.

Была проведена оценка лимитации содержанием биогенных элементов продуцирования органического вещества фитопланктоном на основе концентраций аммонийного (нитритного, нитратного азота) и минерального фосфора [6] по модели Михаэлиса – Ментен – Моно. Рассчитывается, во сколько раз недостаток того или иного биогенного элемента уменьшает максимально возможную интенсивность первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном. Согласно полученным результатам, недостаток азота в водах озёр Прогресс и Степпед (имеющих в феврале 2015 г. содержание нитратов 0,06 мг/л и 0,58 мг/л соответственно) уменьшает максимально возможную удельную скорость роста фитопланктона в верхнем метровом слое воды примерно в 5 раз. Недостаток в воде фосфора уменьшает максимально возможную удельную скорость роста фитопланктона в 10,7 раз для обоих озёр. Этот модельный расчет подтверждает то, что основным биогенным элементом, лимитирующим в летний период первичную продукцию в озёрах элементом, является фосфор.

Устойчивость водных объектов к изменению параметров естественного режима, антропогенному эвтрофированию и изменению качества воды проводилась на основе балльно-индексного метода путем последовательного суммирования индексов для соответствующих признаков, разрядов и баллов по таблицам, получения суммар-

ной балльной оценки и нахождению в итоге класса и подкласса устойчивости водоема режимов [3]. Согласно сумме баллов по устойчивости водоемов оз. Прогресс относится к IV классу (устойчивость ниже средней); оз. Степпед и оз. Верхнее озариса Ширмахера – к III классу (среднеустойчивое); оз. Водоросли – ко II-му классу устойчивости (весьма устойчивое). Т.е. наиболее крупное и олиготрофное приледниковое озеро более уязвимо к изменению параметров режимов, чем меньшие озера с продуктивной экосистемой.

Заключение

Для рассмотренных водоемов оазисов Восточной Антарктиды Холмы Ларсеманн и Ширмахера можно отметить, что, несмотря на олиготрофный тип, водоемы имеют различные характеристики экологических показателей. Так, по индексу видового разнообразия Шеннона-Уивера озера Прогресс и Степпед оазиса Холмы Ларсеманн относятся к загрязненным водоемам (значение индекса 1,46 и 0,94 соответственно). Однако оба эти озера имеют достаточно высокую самоочищающую способность, только для озера Прогресс это связано, в большей степени, с возможностью разбавления талыми водами ледника и наличием большого объема воды приледникового озера, а для о. Степпед немаловажным является высокая фильтрационная активность зоопланктона.

Гидрохимические параметры озер имеют довольно большой диапазон и изменяются в течение летнего сезона – с момента покрытия льдом до окончания таяния. Заметны также особенности влияния природных условий и биоты на гидрохимический состав: вымораживание солей при замерзании льда и повышение концентраций солей в подледном слое, а также увеличение минерализации и растворенного кислорода в придонном слое водоемов. Отмечено, что в летний период именно фосфор является основным биогенным элементом, лимитирующим первичную продукцию в водоемах. В целом, недостаток биогенных элементов в воде уменьшает максимально возможную удельную скорость роста фитопланктона в верхнем метровом слое воды примерно в 5 раз (по содержанию азота) и в 10,7 раз (по концентрациям фосфора).

Три из четырех рассмотренных озер оазисов имеют устойчивость ниже средней,

что говорит о возможных значительных изменениях экосистем озер при климатических или антропогенных на них воздействиях. Менее уязвимым является озеро Водоросли с установившимися параметрами гидрологического режима, развитой экосистемой и отсутствием прямого антропогенного воздействия.

Авторы благодарят за предоставленные гидрохимические данные (пробы 60-й РАЭ) Духову Л.А., а также за логистическую поддержку проведения экспедиционных работ РАЭ.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 15-35-50949-мол_нр. Часть гидрохимических анализов (пробы 58-й РАЭ) получена с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Ресурсный Образовательный Центр по направлению химия» СПбГУ.

Список литературы

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования экосистем. – СПб.: ЗИН РАН, 2000. – 147 с.
2. Дмитриев В.В. Диагностика и моделирование водных экосистем. – СПб.: СПбГУ, 1995. – 215 с.
3. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Прякина Г.В. Методические указания по учебно-производственной практике «Экологическое состояние водных объектов». Учебно-методическое пособие. – СПб.: ВВМ, 2010. – 115 с.
4. Зубов А.И., Краснов А.А. Научно-технический отчет о выполнении программы сезонных гидроэкологических работ на станции Прогресс в период сезона 57 РАЭ. Из фондов ААНИИ. – СПб., 2012.
5. Нигаматзянова Г.Р., Федорова И.В., Духова Л.А. Результаты мониторинга зоопланктонных сообществ пресноводных озер оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) // VIII Международная (заочная) научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и технологий». – Белгород, 2011. В печати.
6. Полевая гидрологическая практика / Под ред. В.С. Вуглинского. Раздел 3. Гидроэкологические работы на озере. Учебная практика студентов 2-го курса. – СПбГУ, 2000. – С. 84–115.
7. Федорова И.В., Саватюгин Л.М., Крылов С.С., Романовская М.В. Характеристика водоемов и водотоков оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида) по материалам гидрологических и георадиолокационных исследований в период МПГ // Международное совещание по итогам МПГ. – Сочи, 2009. – 28 с. http://www.onlinereg.ru/chugaev/tez_ipy.doc.
8. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
9. Cromer L., Gibson J.A.E., Swadling K.M., Hodgson D.A. Evidence for a lacustrine faunal refuge in the Larsemann Hills, East Antarctica, during the Last Glacial Maximum // Journal of Biogeography. – 2006. – Vol. 33. – P. 1314–1323.
10. Laybourn-Parry J., Pearce D.A. The Biodiversity and Ecology of Antarctic Lakes: Models for Evolution / Philosophical Transactions: Biological Sciences, Vol. 362, No. 1488, Antarctic Ecology: From Genes to Ecosystems. Part 2: Evolution, Diversity and Function, 2007. – P. 2273–2289.
11. Shannon C. The Mathematical Theory of Communication. – Urbana, Univ. of Illinois Press, 1949. – 117 p.