СЕКЦИЯ 2. ПРИРОДНАЯ И ПРИРОДНО-РЕСУРСНАЯ СПЕЦИФИКА БАЙКАЛЬСКОЙ АЗИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

SESSION 2. NATURE AND RESOURCE SPECIFICITY OF BAIKAL ASIA AND ADJACENT TERRITORIES.

УДК 574.5

DOI 10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-59-62

ЭКОСИСТЕМЫ СОДОВЫХ ОЗЕР СЕВЕРО-ВОСТОКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В ПОИСКАХ ОТВЕТОВ НА ВЫЗОВЫ ВРЕМЕНИ

*Борзенко С.В., Базарова Б.Б., Куклин А.П., Замана Л.В., Афонина Е.Ю., Таилыкова Н.А.,
Цыбекмитова Г.Ц., Матафонов П.В., Федоров И.А.*

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014 Чита, Россия,
svb_64@mail.ru*

ECOSYSTEMS OF SODA LAKES IN THE NORTH-EAST OF CENTRAL ASIA IN SEARCH OF ANSWERS TO THE CHALLENGES OF THE TIME

*Borzenko S. V., Bazarova B. B., Kuklin A. P., Zamana L. V., Afonina E. Yu., Tashlykova N. A.,
Tsybekmitova G. Ts., Matafonov P. V., Fedorov I. A.*

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

Установлены абиотические границы распространения гидробионтов в соленых, содовых озерах юго-востока Забайкалья. Показано, что в разные климатические фазы экосистемы одних водоемов могут изменяться в пределах одного равновесного состояния, варьируя в рамках определенного диапазона абиогенных и биогенных характеристик, сохраняя неизменным состав первичных продуцентов. В других водоемах изменяется структура первопродуцентов, в связи с чем выделяются два и три альтернативных состояния экосистемы.

Ключевые слова: геоэкология, экосистема, содовые озера, гидробионты.

The abiotic boundaries of the distribution of hydrobionts in salt and soda lakes of the south-east of Transbaikalia are established. It is shown that in different climatic phases, the ecosystems of some reservoirs can change within the same equilibrium state, varying within a certain range of abiogenic and biogenic characteristics, while maintaining the composition of primary producers unchanged. In other reservoirs, the structure of the primary producers changes, and therefore two and three alternative states of the ecosystem are distinguished.

Keywords: geoecology, ecosystem, soda lakes, hydrobionts.

В результате климатической вариабельности и антропогенной деятельности увеличиваются геоэкологические риски, сопровождающиеся сокращением устойчивости и продуктивности природных экосистем. В связи с этим, интегрированные управленческие подходы должны основываться на адекватных геоэкологических концепциях. Возникает вопрос: какая концепция более адекватна для понимания и управления реальными экосистемами? В поисках ответа сосредоточим основное внимание на водных экосистемах, которые играют важнейшую биосферную роль и обеспечивают человечество разнообразными ресурсами и услугами.

На юго-востоке Забайкальского края распространены многочисленные мелководные соленые содовые озера. Они являются самыми северными озерами семиаридной и аридной зоны и ранее не рассматривались в крупных обзорах по соленым озерам Монголии и Китая [8]. Циклический характер многолетних изменений годовых сумм атмосферных осадков территории обуславливает внутривековую цикличность колебания уровня воды в озерах [14]. Меняются соленость, pH, содержания макро- и микро- и биогенных компонентов, и соотношения между ними. Происходит изменение и биоразнообразия, перестройка в функционировании экосистем и переход из одного устойчивого состояния в

другое [5]. Наличие спектра водоемов с различным соотношением гидрохимических и гидробиологических показателей, их вариативность во времени (от сезонов до лет) предполагает существование водных экосистем в разных альтернативных состояниях, которые можно прогнозировать и эффективно использовать их ресурсный потенциал на каждом этапе развития экосистемы. В этой связи основной задачей нашего исследования является определение альтернативно устойчивых состояний экосистем содовых озер северо-востока Центральной Азии в изменяющихся климатических условиях.

Результаты и их обсуждение

Многолетние наблюдения за гидрохимическим состоянием озер показали, что во влажные периоды происходит разбавление воды, а в засушливые, напротив, ее концентрирование. По средним оценкам за 30 лет соленость увеличилась для олиго- и мезогалинных озер в пять раз, а для поли- и гипергалинных более чем в 10-1000 раз соответственно [3]. Такие существенные изменения для разных типов озер и внутри каждого вполне возможны, поскольку все озера отличаются морфометрическими параметрами, условиями водного питания, степенью испарения вод и пр. В последние десятилетия в исследуемом регионе преобладали засушливые годы, это привело к резкому снижению уровней воды в озерах, а некоторые водоемы полностью высохли (Барун Торей, Зун-Торей, Булун-Цаган и др.). Для озер с объемом водной массы от 1 до 10^{-3} км³ TDS увеличилась до 15 мС/см, а при меньших объемах достигала 50 мС/см и более. Рост солености вод сопровождался увеличением концентрации всех основных анионов, а среди катионов Na^+ . В рассматриваемых содовых озерах при $\text{TDS} \leq 100$ мС/см накапливаются более интенсивно $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, чем Cl^- и SO_4^{2-} . Свыше установленного значения солености происходит более интенсивное накопление Cl^- и SO_4^{2-} . В рассматриваемых озерах карбонатная система контролируется pH вод, по мере роста его значения растет активность $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ и снижается CO_2 . Одновременно уменьшаются активности Ca^{2+} и Mg^{2+} , преимущественно за счет образования Ca-Mg-карбонатных минералов (кальцит и доломит), которые осаждаются в донные осадки ($\text{TDS} > 1$ и $\text{pH} > 7.4$). При $\text{TDS} > 10$ и $\text{pH} > 9.2$ образуется гейлюссит, при $\text{TDS} > 25$ и 56 – мирабилит и гипс, $\text{TDS} > 120$ и 360 мС/см образуются гидрогалит и сода соответственно. В водах накапливаются до промышленных концентраций такие микроэлементы как Br, B, F (100 нг/л), Li, As, Sr, U (10 нг/л), REE (100 нг/л) и др. [3]. Меняются содержания и формы их миграции и соответственно их доступность для гидробионтов. Не являются исключением и биогенные элементы. В олиго- и мезогалинных водоемах концентрация аммонийного азота N-NH_4^+ чаще на один-два порядка выше концентрации нитратного азота N-NO_3^- , ситуация меняется на противоположную с ростом солености вод. Содержание в воде соединений фосфора, который присутствует преимущественно в форме ортофосфатов HPO_4^{2-} растет по мере роста солености вод, лимитируя биопродуктивность водоемов.

Многолетние гидробиологические исследования показали, что по мере роста минерализации снижается биоразнообразие гидробионтов, значение первичной продукции фитопланктона, наблюдается смена доминантного состава, изменяются количественные характеристик сообществ [1, 6, 13, 15]. Количество видов высших водных растений в водоемах изменяется от 2 до 11 и от 1 до 3 – макрофитных водорослей. В видовом составе фитопланктона среди диатомовых водорослей начинают превалировать бентосные формы над настоящими планктонными видами, среди зеленых водорослей увеличивается удельный вес монадных форм. Состав сообществ зоопланктона в озерах изменяется от 18 до 2 видов, характеризуется постепенной сменой рачковых ценозов на ротаторный. В зообентосе возрастает роль организмов, способных вести нектобентический образ жизни (амфибиотические насекомые, преимущественно личинки хирономид), чему также способствует отсутствие хищников и рыб. Рыбы (9 видов) обитают в озерах только в период высокой водности. При повышении солености воды меняется возрастная структура популяций рыб, уменьшается доля младших возрастных групп, происходит снижение темпов роста. В целом период низкой водности и высокой минерализации в озерах сохраняются эврибионтные, галотолерантные и гетеротопные виды.

Анализ динамики видового разнообразия гидробионтов озер северо-востока Центральной Азии позволяет нам выделить значимые гидрохимические градиенты, обуславливающие смену экосистем содовых озер. Первым важным градиентом является значения $\text{TDS} = 1$ мС/см и $\text{pH} = 9$. При превышении значений этих параметров из экосистем озер выпадают пресноводные виды, которые сохраняются в озерцах, ручьях, местах выхода пресных подземных вод с соответствующими значениями

гидрохимических показателей. Следующим значимым градиентом для содовых озер является значения $5 \leq \text{TDS} \leq 8 \text{ мС/см}$ и $9.2 \leq \text{pH} \leq 9.6$. В этом диапазоне в экосистеме остаются космополитные, эвригалинные виды, сохраняются условия для развития цветковых растений, которые в комплексе с фитопланктоном и цианобактериями формируют первичную продукцию озера. Сокращение акватории озер переводит в литораль однородную профундаль. Все это снижает многообразие экотопов и разнообразие высших водных растений, рыб, зоопланктона и зообентоса. При достижении $\text{TDS} \approx 8 \text{ мС/см}$ и $\text{pH} \approx 9.5$ из экосистем содовых озер исчезают крупные организмы (водные растения, рыбы). Увеличивается доля мелкоразмерных видов планктона и микроорганизмов, т.е. галоалкалолентных и галоалкалофильных видов [12]. Так, верхняя граница существования для карася составляет $\text{pH} \approx 9.5$ и $\text{TDS} \approx 5 \text{ мС/см}$, а для сазана – $\text{pH} \approx 9.5$ и $\text{TDS} \approx 8 \text{ мС/см}$. В этом случае высокие значения основных гидрохимических показателей оказывают неблагоприятное влияние на осморегуляцию рыб [11]. При $8 < \text{TDS}$ и $9.3 \leq \text{pH} \leq 9.6$ в создании первичной продукции в экосистеме участвуют планктонные организмы и прокариотические микроорганизмы (цианобактерии и анаэробные фототрофные бактерии (АФБ)).

Понятно, что рост солености вод и pH меняет соотношение основных ионов. Все это в совокупности оказывает влияние на физиологию гидробионтов. К примеру, рост значений Na^+ , NaHCO_3 , Na_2CO_3 неблагоприятно отражается на тургоре клеток высших водных растений. Снижение содержания CO_2 при росте TDS и pH в содовых озерах исключает из фитопланктона виды не способные утилизировать HCO_3^- [4]. Низкие концентрации Ca^{2+} приводят к нарушению метаболических процессов у беспозвоночных, которые утилизируют его непосредственно из воды. Этот список можно дополнить и другими химическими элементами, входящими в состав живых организмов, таких как кремний, сера, железо, молибден, марганец и т.д. Сопряженность гидробиологических и гидрохимических процессов четко прослеживается по изменению, в том числе, количества биогенных элементов и значений их соотношений. Высокая соленость и pH вод приводит к угнетению развития водорослей и их активному разложению до образования различных минеральных форм азота, поэтому в озерах на высших стадиях их осолонения отмечается избыток солей азота. Уменьшающиеся концентрации Ca^{2+} в водах с ростом pH приводят к тому, что фосфор не связывается в нерастворимые минералы, поэтому последний перестает быть лимитирующим элементом в более соленых озерах.

Таким образом, можно выделить масштабное экологическое и эволюционное явление, за которым основная масса олигогалинных гидробионтов не в состоянии распространяться в более минерализованных водах, и, напротив, представители фауны соленых водоемов не проникают в пресные воды. Выделенные градиенты закономерны для содовых озер, для озер хлоридного и сульфатного типов они существенно выше. Для первых TDS 5-8 мС/см выступает как экологическая граница, являющаяся физиологическим и эволюционным барьером биоразнообразия [7]. При $\text{TDS} > 35\text{--}40 \text{ мС/см}$ происходит уменьшение общего количества видов эукариотных организмов [9].

Механизм формирования химического состава соленых содовых озер отличается от механизма формирования озер хлоридного типа [2]. В отличие от соленых хлоридных и сульфатных озер, в которых с ростом солености значение pH снижается и, как следствие, растет концентрация CO_2 , параллельно накапливается Ca^{2+} . В свою очередь, последний ограничивает накопление в озерах $\text{P}_{\text{общ}}$, поэтому его содержание остается относительно низким на всем диапазоне солености. Напротив, в содовых озерах до $\text{TDS} \approx 100 \text{ мС/см}$ значение pH растет (до 10.7), далее, по мере роста солености вод, постепенно значение pH снижается, но остается относительно высоким ($\text{pH} = 9.2$ при $\text{TDS} = 360 \text{ мС/см}$). Высокая концентрация Na^+ и CO_3^{2-} , HCO_3^- создает в зависимости от солености воды мощную буферную систему, которая является токсичной для высших организмов, по сравнению с нейтральными хлоридными и сульфатными ионами. Отсюда в содовых озерах важным фактором, ограничивающим развитие высших организмов, является не только соленость, но и pH вод, содержание макро- и биогенных элементов. В то же время содовые озера богаты и разнообразны по микрофлоре. Высокое значение pH не служит ограничивающим фактором для них потому, что в результате фотосинтеза в их плотных массах показатель может достигать $\text{pH}=11$. Получается, что на высших стадиях осолонения содовые водоемы — наиболее характерное местообитание для широкого спектра бактерий, в противоположность, к примеру, хлоридным морям, где разнообразие микробиоты не так велико [10].

Таким образом, многолетние комплексные исследования содовых озер северо-востока Центральной Азии показывают, что альтернативно устойчивые состояния экосистем формируются и сменяются вслед за изменением гидрохимических показателей водоемов. Изменения абиотических параметров приводят к переходу экосистемы из одного состояния в другое. При этом реакция каждой экосистемы на изменение климатических параметров разная. Экосистемы одних водоемов могут изменяться в пределах одного равновесного состояния. При этом, биоразнообразие экосистемы не находится в статичном состоянии, а варьирует в рамках определенного диапазона количественных и качественных характеристик, сохраняя неизменным состав первичных продуцентов. Например, гиперсоленое оз. Борзинское. В других водоемах изменяется структура первопродуцентов, в связи с чем выделяются два и три альтернативных состояния (фаза) экосистемы. В 2-х фазных экосистемах, при росте солености исчезающие макрофиты в продуцировании замещаются водорослями фитопланктона, в структуре консументов выпадают рыбы (олиго-, мезогалинный переход), либо водоросли фитопланктона замещаются микробными матами. На 3-й фазе истинно планктонные виды продуцентов уступают мелкоразмерным бентосным формам, формирующим колонии (цианобактериальные и микробные маты) (олиго-, мезо-, полигалинный переход; мезо-, поли-, гипергалинный).

Таким образом, полученные знания о динамике альтернативных состояний экосистемы являются ключевым научным элементом для обоснования устойчивого управления окружающей средой и важным заданием с точки зрения ресурсного потенциала содовых соленых озер юго-востока Забайкалья, будь то минеральные полезные ископаемые (соли, микроэлементы, сероводородные иловые отложения и др.) или гидробиологические компоненты.

Список литературы

1. Bazarova B. B., Tashlykova N. A., Afonina E. Yu., Kuklin A. P., Matafonov P. V., Tsybekmitova G. Ts., Gorlacheva E. P., Itgilova M. Ts., Afonin A. V., Butenko M. N. Long-term fluctuations of the aquatic ecosystems in the Onon-Torey Plain (Russia). *Acta Ecologica Sinica*. 2019, Vol. 39, pp. 157-165.
2. Borsenko S. V., Shvartsev S. L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*. 2019, Vol. 103, pp. 72-84.
3. Borzenko S. V. Principal Parameters Controlling Water Composition in Saline and Brackish Lakes in Eastern Transbaikalia. *Geochemistry International*. 2020, Vol. 58, Is. 12, pp. 1382-1399.
4. Padisa'k J., Naselli-Flores L. Phytoplankton in extreme environments: importance and consequences of habitat permanency. *Hydrobiologia*. 2021, Vol. 848, pp. 157-176.
5. Scheffer M., Alternative attractors of shallow lakes. *The Scientific World*. 2001, Vol. 1, pp. 254-263.
6. Tashlykova N. A., Afonina E. Y., Kuklin A. P., Bazarova B. B., Matafonov P. V., Tsybekmitova G. Ts., Gorlacheva E. P., Itgilova M. Ts., Butenko M. N. Ecological Features Of The Hydrobiocenoses Of Some Lakes Of The Onon-Torey Plain In Different Hydrological Periods. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018, Vol. 9, № 5, pp. 734-752.
7. Telesh I. V., Khlebovich V. V. Principal processes within the estuarine salinity gradient: a review. *Marine Pollution Bulletin*. 2010, Vol. 61, pp. 149-155.
8. Williams W. D. Chinese and Mongolia saline lakes: a limnological overview. *Hydrobiologia*. 1991, Vol. 210, pp. 39-66.
9. Балущкина Е. В., Голубков С. М., Голубков М. С., Литвинчук Л. Ф., Шадрин Н. В. Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную организацию экосистем соленых озер Крыма // *Журнал общей биологии*. 2009. Т. 70. № 6. С. 504-514.
10. Заварзин Г. А., Жилина Т. Н. Содовые озера — природная модель древней биосферы континентов // *Природа*. 2000. №2. С. 4555.
11. Никольский Г. В. Экология рыб. М.: Высшая школа, 1974. 368 с.
12. Компанцева Е. И., Брянцева И. А., Комова А. В., Намсараев Б. Б. Структура фототрофных сообществ в содовых озерах Юго-Восточного Забайкалья // *Микробиология*. 2007. Т. 76. № 2. С. 243-252.
13. Куклин А. П., Цыбекмитова Г. Ц., Горлачева Е. П. Состояние водных экосистем озер Онон-Торейской равнины за 1983-2011 годы (Восточное Забайкалье) // *Аридные экосистемы*. 2013. Т. 9. №3 (56). С. 16-26.
14. Обязов В. А. Изменения современного климата и оценка их последствий для природных и природно-антропогенных систем Забайкалья. Автореф. дисс. ... д-ра геогр. наук. Казань, 2014. 38 с.
15. Содовые озера Забайкалья: экология и продуктивность / отв. ред. А. Ф. Алимов. Новосибирск: Наука, 1991. 215 с.