

ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.5; 561.26

**ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ
ДИАТОМОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В ОЗЕРАХ БОРОЕ И ГЛУБОКОЕ****Л.В. Разумовский*, М.А. Гололобова***(кафедра микологии и альгологии; e-mail: gololobovama@mail.ru)*

Метод графического анализа таксономической структуры диатомовых комплексов позволяет установить два основных сценария их трансформации. Первый определяется абиотическим воздействием извне при стабильных параметрах самой экосистемы. Второй определяется изменением параметров самой экосистемы и соответствует переходным этапам в ее развитии. В данной работе исследованы диатомовые комплексы из донных отложений двух озер: Боровое (Новгородская обл.) и Глубокое (Московская обл.). Для экосистемы оз. Боровое в течение всего исследованного периода (последние 500—550 лет) был характерен только первый из упомянутых сценариев. В оз. Глубокое выявлено два периода, для которых характерен первый сценарий, и два переходных периода, для которых был характерен второй сценарий. Таким образом, если экосистема оз. Боровое была стабильна в течение последних 500 лет, то экосистема оз. Глубокое подвергалась серьезным перестройкам.

Ключевые слова: диатомовый комплекс, озерная экосистема, трансформация, графический анализ.

Озера являются традиционными объектами палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций. Для этого существует несколько причин. Первая из них — естественная, природная целостность (дискретность) изучаемого объекта. Вторая — слабый гидродинамический режим по сравнению с экосистемами проточного типа. Третья — возможность сравнить полученные результаты с информацией об озерах из других регионов, если их морфометрические параметры (глубина, размеры, рельеф дна) и гидродинамический режим сопоставимы. Кроме того, озерные осадки формируются под воздействием комплексных природных условий, характерных для всей территории их водосбора. Малые озера, имеющие площадь водного зеркала менее 1 км², обладают рядом дополнительных преимуществ при реконструкции палеоклиматических условий. Для значительной части малых озер характерны следующие признаки: простота очертаний (округлое или эллипсоидное), отсутствие сложнодифференцированного рельефа дна, замедленный сток или абсолютная непроточность.

При оценке трансформаций, происходящих в озерных экосистемах во времени и пространстве, широко используется метод диатомового анализа. Диатомовые водоросли (класс Bacillariophyceae, отдел Ochrophyta) — широко распространенная группа водорослей. Кремнеземные панцири диатомей хорошо

сохраняются в озерных отложениях и формируют диатомовые комплексы, характерные для каждого конкретного природно-климатического этапа в регионе. Качественный и количественный состав диатомей тесно связан с гидрохимическими показателями воды. Как и любой метод, диатомовый анализ имеет свои достоинства и недостатки, а также границы применения. Вместе с тем диатомовый анализ имеет значительный неиспользованный информационный резерв. Наглядным подтверждением этого факта является разработанный метод графического сопоставления таксономических пропорций в диатомовых комплексах [1, 2].

Материалы и методы

В работе были исследованы диатомовые комплексы озер Боровое и Глубокое, которые относятся к категории малых озер и расположены на территориях с относительно слабым уровнем техногенных и рекреационных нагрузок.

Оз. Боровое расположено на Валдайской возвышенности, в Валдайском р-не Новгородской обл. (57°56' с.ш. и 33°14' в.д.). Для обрамляющих его территорий характерен холмисто-котловинный рельеф [3]. Вероятно, озеро имеет гляциокарстовое происхождение. Длина озера 1425 м, ширина в центральной части 620 м, максимальная ширина 675 м, максимальная глубина 10 м. Котловина озера имеет параболическую форму.

* Институт водных проблем РАН.

ческие очертания, площадь зеркала — 0,69 км². Озеро относится к категории олиготрофных водоемов [4].

Оз. Глубокое расположено в Рузском р-не Московской обл. (55°45' с.ш. и 36°31' в.д.). Длина озера 1200 м, ширина 850 м, средняя глубина 9,3 м, максимальная глубина 33 м. Скорее всего, озеро имеет гляциокарстовое происхождение (об этом свидетельствуют очертания и рельеф озерной котловины, однако прямых доказательств не имеется) [5]. Профиль котловины озера имеет форму конусовидной воронки с развернутыми краями, площадь зеркала — 0,59 км². Оз. Глубокое относится к категории мезотрофных водоемов [6].

Из оз. Борое 4 апреля 2003 г. была отобрана колонка донных осадков длиной 52 см. Отбор проводили штанговым стратометром со льда, в точке наибольшей глубины озера (10 м).

Из оз. Глубокое 1 августа 2003 г. была отобрана колонка донных осадков длиной 106 см. Отбор осуществляли ударной колонкой (ГОИН-1,5) — с лодки, в центральной части озера, с глубины 30 м.

Обе колонки были разрезаны с интервалом в 1 см, за исключением верхних, наиболее обводненных частей колонок, где отбор проводился с интервалом 1,5 см. Всего на содержание диатомовых комплексов было проанализировано 155 проб (51 проба из оз. Борое и 104 пробы из оз. Глубокое).

Обработка проб для проведения диатомового анализа, изготовление и просмотр постоянных препаратов осуществлялись по стандартным методикам [7].

Исследования трансформаций диатомовых комплексов проводили методом графического анализа. Первоначально метод графического сопоставления был разработан для донных комплексов из современных озерных осадков [1]. Сам способ построения графиков достаточно прост. Для каждого комплекса определяется относительная численность всех идентифицированных таксонов видового и более низких рангов (далее в тексте — таксонов). При построении графиков по оси абсцисс откладывается число, соответствующее числу идентифицированных таксонов, а по оси ординат — их относительная численность, присущая каждому таксону в анализируемом комплексе. Таксоны ранжируются по изменению показателя относительной численности в сторону его уменьшения (начиная с самых массовых видов и заканчивая единично встречающимися). В результате получается график (или гистограмма) соотношения общего числа таксонов и их относительной численности (процентных пропорций) в сторону убывания последней. Анализ полученных графиков (гистограмм) проводится в линейной и логарифмической системе координат. В логарифмической системе координат анализируются не сами графики, а их тренды, представленные результирующими прямыми линиями.

Результаты

В логарифмической системе координат трансформация во времени диатомовых комплексов оз. Борое описывается единым сценарием. Результирующие линии образуют на полученном графике компактную генерацию вокруг некой локальной области (рис. 1).

Сценарий трансформации сводится к незначительным модуляциям вокруг области устойчивого трофико-метаболического функционирования. На графике это выражается в высоком уровне локализации области “вращения” результирующих линий, которые характеризуют таксономические пропорции в диатомовых комплексах (рис. 1).

Расчет темпов осадконакопления в оз. Борое дал возможность оценить длительность изученных процессов трансформации. В исследованной колонке осадки накапливались приблизительно 500—550 лет [8]. Можно констатировать отсутствие выраженного негативного воздействия извне. Серьезных перестроек в структуре диатомовых комплексов не выявлено. Это свидетельствует о высоком уровне стабильности экосистемы.

Сценарий трансформации диатомовых комплексов в экосистеме оз. Глубокое более сложен. Его можно разделить на несколько этапов. В интервалах 1,0—40 см, 63—100 см и 103—104 см трансформация диатомовых комплексов протекает по аналогичным сценариям, что и в оз. Борое (рис. 2, а). Результирующие линии образуют единую генерацию (пучок линий) с общей областью “вращения”. Однако между собой эти этапы имеют некоторое различие.

В интервале 1,0—40 см генерация результирующих линий более компактна, как и образующаяся область “вращения”. Соответственно результирующие линии в интервалах 63—100 см и 103—104 см образуют менее цельную генерацию, а единая область “вращения” менее выражена (рис. 2, а). Это означа-

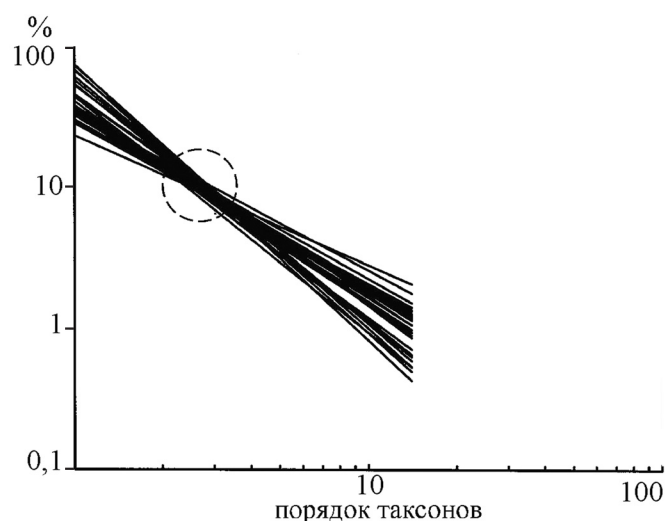


Рис. 1. Трансформация диатомовых комплексов оз. Борое; сплошными линиями показаны результирующие, пунктирной линией — очертания полученной генерации

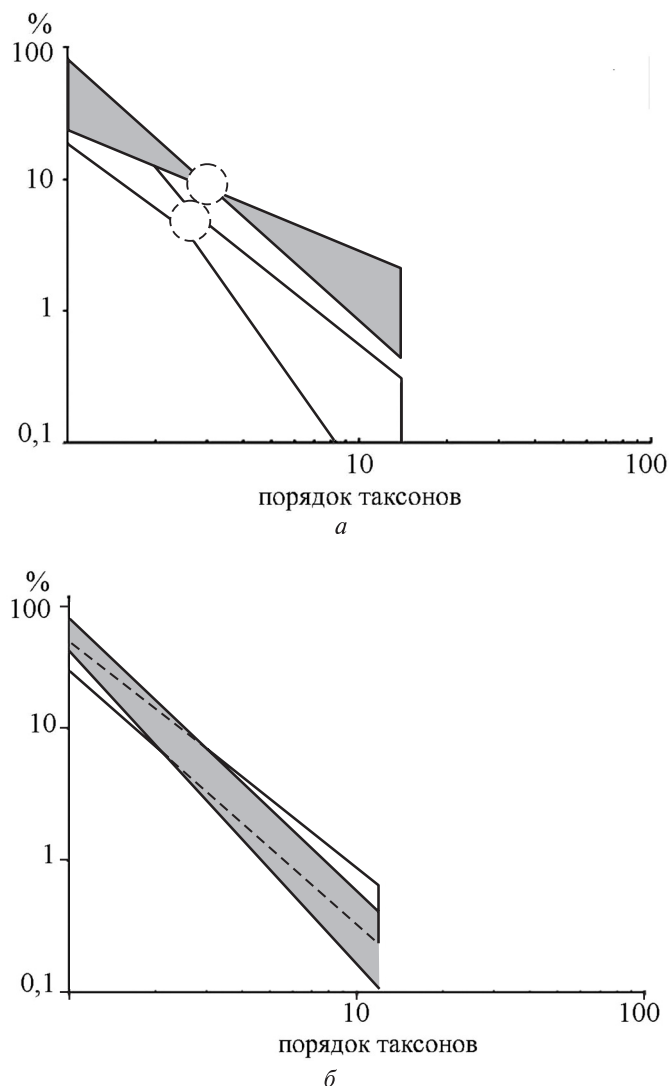


Рис. 2. *а* — трансформации диатомовых комплексов оз. Глубокое при стабильном состоянии экосистемы, очертания двух генераций показаны серым цветом (интервал 1,0—40 см) и белым цветом (интервал 41—67 см); *б* — трансформации диатомовых комплексов оз. Глубокое при нестабильном состоянии экосистемы, очертания двух генераций показаны серым цветом (интервалы 63—100 см и 103—104 см) и белым цветом (интервалы 99—102 см и 104—106 см)

ет, что экосистема, сформировавшаяся в интервале 63—104 см, менее устойчива, чем экосистема, сформировавшаяся в интервале 1,0—40 см.

Так же различаются и другие параметрические значения, определяемые таксономической структурой диатомовых комплексов. Отличия определяются числом таксонов, входящих в доминирующую группу, и нижним порогом их относительной численности, который поддерживает целостность экосистемы. В результате образовавшиеся в этих интервалах области “вращения” не совпадают (рис. 2, *а*).

Между двумя устойчивыми генерациями располагается переходная зона (интервал 41—67 см). В этом интервале разреза трансформация происходит по иному сценарию. Для него характерно параллельное (или почти параллельное) расположение

результатирующих линий (рис. 2, *б*). Сходный сценарий трансформации отмечен для самой нижней части разреза, в интервалах 99—102 см и 104—106 см (рис. 2, *б*). Расположение двух генераций результирующих линий, которые характеризуют этот сценарий трансформации, также не совпадает (рис. 2, *б*).

Такое расположение результирующих линий было впервые выявлено вдоль температурного градиента подогретых вод, поступающих из сбросового канала Кольской атомной электростанции в оз. Имандра [9]. Аналогичное явление было отмечено для группы озер с разным показателем pH [10]. Кроме того, параллельное расположение результирующих линий характерно для озер, в которых протекают процессы быстрого обмеления: оз. Галичское (Костромская обл.) и оз. Хмелевское (Краснодарский край) [9, 11]. Во всех перечисленных случаях речь не идет о внешних факторах воздействия — меняются свойства самой среды обитания ($t^{\circ}\text{C}$, pH, морфометрия водоема).

Следует отметить, что интервалы, в которых преобладает тот или иной сценарий (вращение или параллельное расположение результирующих линий), имеют только одну выраженную границу: 40—41 см. Во всех остальных случаях существуют переходные зоны, в которых попеременно преобладает один из двух выявленных сценариев. Это явление наиболее выражено в нижней части изученного разреза озерных осадков (99—106 см).

Обсуждение

По генерации результирующих линий, которая была получена для оз. Боровое, можно сделать вывод об отсутствии кардинальных перестроек в экосистеме озера и возможного негативного воздействия извне (рис. 1). Таким образом, для этого региона (Валдайская возвышенность) оз. Боровое является эталонным, модельным водоемом, не подвергавшимся негативным нагрузкам антропогенного генезиса на всех изученных этапах его существования.

Иначе развивалась и трансформировалась экосистема оз. Глубокое. Процессы, происходившие в этом озере, не ограничиваются двумя этапами стабильного развития и переходным периодом между ними. Поэтому, даже с некоторой долей предположительности, это не может быть объяснено изменением внешних условий среды. Наличие еще одного, самого раннего из изученных этапов трансформации экосистемы ставит под сомнение подобную трактовку событий.

Кроме того, нет никаких свидетельств, что в этом регионе, как и на Валдайской возвышенности, в анализируемый временной интервал (350—400 лет) происходили какие-либо кардинальные климатические изменения. Этот вывод был сделан на предыдущем этапе исследований, при унификации биоиндикаци-

онных методов, основанных на диатомовом анализе. При реконструкции динамики изменения важнейших гидрологических параметров ($t^{\circ}\text{C}$, pH и сапробность) для обоих озер были выявлены температурные циклы. Они соответствуют так называемым “столетним” циклам солнечной активности [8, 12]. Выявленная температурная цикличность не совпадает с этапами экосистемных перестроек в оз. Глубокое. Следовательно, она не может быть причиной этих изменений. Кроме того, в оз. Боровое сходные, циклические изменения температурного режима не привели к существенным трансформациям экосистемы.

Помимо циклических изменений упомянутых параметров (pH и сапробность), которые опосредованно определяются изменением температурного режима, в оз. Глубокое выявлена направленная изменчивость катионно-анионного баланса и уровня концентрации биогенов [12]. Однако эти изменения протекали постепенно, на протяжении всего проанализированного промежутка времени (около 350–400 лет). Численные значения этих изменений также не очень велики. Следовательно, их направленное смещение не затрагивает порог адаптивности диатомовых ассоциаций.

На основе вышеизложенного объяснить перестройки в экосистеме оз. Глубокое внешними факторами или изменением параметров гидрологической среды в самом озере нельзя. Тем не менее эти трансформации происходили. В чем же их причина?

Как уже упоминалось, параллельное расположение результирующих линий может быть обусловлено

не только гидрофизическими и гидрохимическими процессами в экосистеме, но и изменениями в морфометрии самого озера. Основной отличительной особенностью оз. Глубокое является постоянное повышение уровня воды и следовавшее за ним изменение площади и очертаний его акватории [5]. Именно это и является основной причиной нескольких этапов становления современной экосистемы озера.

Из полученных результатов следует, что процессы увеличения глубин в озере при заполнении его котловины водой носили нелинейный характер. Соответственно эпохи относительной стабильности перемежались эпохами заметных перестроек в экосистеме озера. Эпохи относительной стабильности соответствуют генерациям результирующих линий с единой областью их пересечения (область “вращения”) (рис. 2, а). Эпохи перестроек характеризуются преобладанием параллельного расположения результирующих линий (рис. 2, б).

Таким образом, благодаря методу графического сопоставления таксономической структуры диатомовых комплексов нами сделаны предположения о неравномерности темпов перестроек экосистемы в оз. Глубокое и отсутствии таковых в оз. Боровое.

* * *

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ (государственный контракт № 02.512.11.2284).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разумовский Л.В. Биоиндикация уровня антропогенной нагрузки на тундровые и лесотундровые ландшафты по диатомовым комплексам озер Кольского полуострова. М.: ИРЦ Газпром, 1997. 92 с.
2. Разумовский Л.В. Оценка качества вод на основе анализа структуры диатомовых комплексов // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 6. С. 742–750.
3. Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Недогарко И.В., Субетто Д.А., Хомутова В.И. История озер северо-запада Восточно-Европейской равнины. Гл. 4 // История озер Восточно-Европейской равнины (История озер). СПб.: Наука, 1992. С. 79–93.
4. Недогарко И.В., Федоров А.С., Волкова Л.Д. Опыт исследования миграции биогенных веществ на водосборах характерных водораздельных озер Валдайской возвышенности // Труды ГГИ. 1988. Вып. 331. С. 112–124.
5. Щербаков А.П. Озеро Глубокое. Гидробиологический очерк. М.: Наука, 1967. 380 с.
6. Smirnov N.N. (Ed.). Lake Glubokoe // Hydrobiologia. 1986. Vol. 141. 164 p.
7. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
8. Разумовский Л.В. Новейшая история озера Боровое по результатам диатомового анализа // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 98–109.
9. Разумовский Л.В. Оценка трансформации пресноводных экосистем методом диатомового анализа // Мат-лы Междунар. науч. конф. и VII Школы по морской биологии 9–13 июня 2008 г., Ростов-на-Дону. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. С. 295–298.
10. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
11. Разумовский Л.В. Реконструкция температурных циклов и сукцессионных изменений по диатомовым комплексам из донных осадков на примере Галичского озера // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 6. С. 595–608.
12. Разумовский Л.В., Гололобова М.А. Реконструкция температурного режима и сопряженных гидрологических параметров по диатомовым комплексам из озера Глубокое // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 4. С. 490–504.

LONG-TERM TRANSFORMATION OF DIATOM ASSEMBLAGES IN BOROE AND GLUBOKOE LAKES

L.V. Razumovsky, M.A. Gololobova

Method of the graphical analysis of transformations of the diatom assemblage's taxonomic structure allows to reveal two main scenarios. The first scenario is determined by external abiotic influence to the ecosystem, while internal ecosystem parameters remain to be stable. The second scenario is determined by changing of internal ecosystem parameters, it is characteristic of some transitional periods in the ecosystem history. We studied the diatom assemblages of the sediment cores from Lake Boroe (Novgorod Area) and Lake Glubokoe (Moscow Area). The only first scenario was characteristic for the diatom assemblages of Lake Boroe during all the period studied (500—550 last year). In Lake Glubokoe core, we found two periods of the first scenario, and two transitional periods of the second scenario. Therefore, if the ecosystem of Lake Boroe was relatively stable during the last 500 years, the ecosystem of Lake Glubokoe survived some strong transformations.

Key words: *diatom assemblage, lake ecosystem, transformation, graphical analysis.*

Сведения об авторах

Разумовский Лев Владимирович — докт. геогр. наук, вед. науч. сотр. группы продукционно-деструкционных процессов Института водных проблем РАН. Тел.: 8-499-135-15-04; e-mail: razum@aqua.laser.ru

Гололобова Мария Александровна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-27-64; e-mail: gololobovama@mail.ru