

УДК 561.261:574.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАТОМОВЫХ ИНДЕКСОВ ТРОФНОСТИ И САПРОБНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ОЗЕР УРАЛА

А. В. Масленникова, В. О. Гулаков, П. Г. Аминов, Н. В. Удачин, К. А. Филиппова

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН

Диатомовые индексы трофности и сапробности широко применяются для изучения эвтрофирования и органического загрязнения водных экосистем. Использование диатомовых индексов не только для оценки современного состояния, но и для изучения динамики озерных экосистем, с помощью палеолимнологических исследований, может дать ценную информацию о факторах и скорости процесса эвтрофирования. Однако информативность диатомовых индексов, разработанных для одних регионов, для других территорий и типов водных экосистем, остается дискуссионной. Целью нашего исследования является определение возможностей и ограничений использования диатомовых индексов, полученных для анализа состояния речных и озерных экосистем Европы, Великобритании, Южной Америки и Японии, для оценки экологического состояния и динамики развития озер Урала. На основе результатов диатомового анализа поверхностных отложений 72 озер Среднего и Южного Урала рассчитано 23 диатомовых индекса. Несмотря на различия в типе водной экосистемы, субстрате и способе отбора проб, корреляционный анализ показал наличие взаимосвязи между гидрохимическими параметрами, ассоциирующими с эвтрофированием и органическим загрязнением (цветность, содержание общего и органического фосфора, азота, углерода, нитратов, фосфатов), и 14 диатомовыми индексами, разработанными в Центральной Европе, Великобритании и Японии. Установлено, что главным условием использования диатомового индекса при экологической оценке является наличие экологической информации о не менее чем 60% видов диатомового сообщества оцениваемого водного объекта в базе данных применяемого диатомового индекса. На основе кластерного анализа выделено четыре группы индексов, коррелирующих с различными гидрохимическими параметрами. Выявлено статистически значимое отличие абсолютных величин диатомовых индексов, рассчитанных для эвтрофных и мезотрофных озер. Определено, что абсолютные

значения индексов, переведенные в общую шкалу от 1 до 20, рассчитанные на основе одного диатомового комплекса, могут варьировать, так как экологическая информация по одним и тем же таксонам для разных индексов часто отличается. Сделано заключение, что при экологической оценке необходимо учитывать влияние на диатомовое сообщество, а следовательно и на диатомовый индекс, не только переменных, связанных с биогенными элементами, но и других гидрохимических параметров, например, электропроводности и рН воды. Поэтому, параллельно с расчетом диатомовых индексов, рекомендовано выполнение количественных реконструкций или непосредственных измерений электропроводности и рН соответственно при палеолимнологических исследованиях и при оценке современного состояния озер.

Ключевые слова: диатомовые индексы сапробности и трофности, донные отложения, озеро, экологическое состояние, эвтрофирование, Урал.

DETERMINATION OF TROPHIC AND SAPROBITY DIATOM INDICES APPLICABILITY IN ASSESMENT OF LAKES ECOLOGICAL STATE AND DYNAMICS IN THE URALS (RUSSIA)

A. V. Maslennikova, V. O. Gulakov, P. G. Aminov, N. V. Udachin, K. A. Filippova

Diatom trophic and saprobity indices are widely used to study eutrophication and organic pollution of aquatic ecosystems. The diatom indices could be applied not only for assessment of contemporary lake ecological state, but also for study of lake ecosystem dynamic. Such paleolimnological research will provide valuable information about the factors and speed of the eutrophication process. However, the possibility of application of diatom indices developed some regions in other territories is the matter of debate. The purpose of our study is to determine the possibilities and limitations of using diatom indices developed for river and lake ecosystems in Europe, Great Britain, South America and Japan, to assess the ecological state and dynamics of the Ural lakes. Based on the results of diatom analysis of surface sediments of 72 lakes of the Middle and Southern Urals, 23 diatom indices were calculated. Despite the differences in the type of aquatic ecosystem, substrate and sampling method, correlation analysis showed a relationship between hydrochemical parameters associated with eutrophication and organic pollution (color, total and organic phosphorus, nitrogen, carbon, nitrates, and phosphates) and 14 diatom indices developed in Central Europe, Great Britain, and Japan. It is established that the main condition for application of diatom index is the availability of ecological information about more than 60% of the diatom

assemblage species of assessed water body in the database of the applied diatom index. Based on cluster analysis, four groups of indices correlating with various hydrochemical parameters were identified. A statistically significant difference in the absolute values of diatom indices calculated for eutrophic and mesotrophic lakes was revealed. It was determined that since ecology of the same taxa for indices often differs, the absolute values of the indices, transformed into a general scale from 1 to 20, calculated on the basis of the same diatom assemblage, can vary. Diatom indices are influenced not only by nutrient variables but also by other hydrochemical parameters such as pH and electrical conductivity. Therefore, in parallel with the calculation of diatom indices, it is recommended to perform quantitative reconstructions or direct measurements of electrical conductivity and pH in paleolimnological studies and in assessing of contemporary state of lakes.

Keywords: trophic and saprobity diatom indices, lake sediments, lake, ecological state, eutrophication, Ural.

Введение

В связи с глобальным эвтрофированием водных экосистем адекватная оценка качества воды и изучение динамики развития озер приобретает все большее значение. Трофический статус водоема и качество воды определяется на основе гидрохимических данных, а также с помощью биоиндикационных методов. Диатомовые водоросли являются важными биоиндикаторами, характеризующимися значительной чувствительностью к изменениям гидрохимических параметров, в том числе к содержанию биогенных элементов. Для определения трофического статуса и оценки качества воды разработано большое количество диатомовых индексов, 23 из которых автоматически рассчитываются в программе Omnidia v. 6.1.4 (Lecointe et al., 1993), позволяющей проводить экологический анализ водных экосистем (Табл. 1). Большая часть диатомовых индексов вычисляется на основе уравнения взвешенного среднего и отличается списком таксонов в калибровочной базе данных индекса и значениями переменных, характеризующих чувствительность диатомей к эвтрофированию и (или) органическому загрязнению.

Использование диатомовых индексов не только для оценки современного состояния, но и для изучения динамики озерных экосистем, с помощью палеолимонологических исследований, может дать ценную информацию о скорости процесса эвтрофирования и роли антропогенных и природных факторов в изменении озера. Однако, все рассчитываемые в программе Omnidia v. 6.1.4 индексы, за исключением TDIL, EPI-L, LTDI2 (Табл. 1), получены на основе исследования речных экосистем. Кроме того,

способ отбора проб для диатомового анализа отличался от применимых в палеолимнологии методов. Так, при получении диатомовых индексов (Табл. 1) использовались образцы, отобранные на различных естественных и искусственных субстратах рек, ручьев и в литорали озер. В то время как, для палеолимнологических исследований используются донные отложения, накопленные в зоне аккумуляции, на средней или максимальной глубине озера. Поверхностные озерные отложения 72 озер, отбирались для данного исследования таким же образом.

Анализ применения диатомовых индексов для оценки качества водных экосистем различных территорий показал противоречивые результаты. Так, диатомовые индексы, разработанные в Великобритании и Австрии, оказались неэффективны для оценки трофического статуса водотоков бассейна Ладоги (Русанов и Станиславская, 2011). Определение возможности применения диатомовых индексов для оценки качества воды р. Москвы, показало завышение качества при применении индекса сапробности Пантле-Букка в модификации Сладечека (Sla, Sládeček, 1986) и соответствие значений индекса загрязнения по Т. Ватанабе (WAT, Watanabe et al., 1986) данным гидрохимии (Хазанова, 2014). Диатомовый биологический индекс, полученный на основе исследования речных систем Франции (Prygiel and Coste, 2000), показал значимую корреляцию с концентрацией органических и минеральных форм азота и фосфора, но не корректные значения при оценке качества вод водотоков с антропогенно трансформированным гидрологическим режимом (Хазанова и др., 2015). Неточности в оценке состояния озер Мурманской области с помощью индекса Sla связывались с малым количеством видов сапробионтов и отсутствием учета влияния тяжелых металлов (Денисов, 2014; Denisov et al., 2020). Выявлена ограниченность применения диатомового индекса, разработанного для определения степени эвтрофирования и загрязнения рек Италии (EPI-D, Dell'Uomo, 1996), для Израиля, Пакистана, Индии и Казахстана, что связывалось с незначительной ролью диатомей в сообществе водорослей (Varinova, 2011). В то же время, некоторые диатомовые индексы, полученные в Европе, оказались информативны при оценке экологического состояния рек Эфиопии (Wondmagegn et al., 2019), Турции (Solak et al., 2020), Австралии, Китая (Tan et al., 2017), Южной Африки (Taylor et al., 2009) и Центральной Индии (Srivastava et al., 2017). На Урале для оценки экологического статуса озер и палеолимнологических исследований, используют несколько индексов. Оценка трофического статуса трех озер северной части Увильдинской зоны, с помощью индекса Sla, показала, что установленные биоиндикационным методом классы качества вод согласуются с

данными гидрохимического анализа (Еремкина, 2010). Из трех индексов (Sla, EPI-D и DAIPo), рассчитанных для оз. Б. Миассово (Южный Урал), наилучшее соответствие гидрохимическим и гидрофизическим параметрам показал Sla. В то время как DAIPo и EPI-D соответственно завышали и занижали качество воды (Исакова, 2016). Для палеолимнологических реконструкций на Урале применяли только индексы Sla и DAIPo, причем их информативность не оценивалась (Maslennikova and Udachin, 2017). Использование новых диатомовых индексов повысит надежность оценки экологического статуса озер и палеолимнологических реконструкций Урала. Поэтому, целью данного исследования является установление возможности применения 23 диатомовых индексов для определения экологического состояния и палеолимнологических исследований озер Урала на основе изучения взаимосвязи гидрохимических параметров и диатомовых индексов, рассчитанных в результате исследования поверхностных отложений 72 озер (рис. 1).

Материалы и методы

Полевые работы

Названия 72 озер, координаты точек отбора проб, данные гидрохимии (за исключением результатов по содержанию общего фосфора, азота и углерода) и диатомового анализа поверхностных отложений опубликованы в открытом доступе (Maslennikova, 2019; <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904663>). Отбор проб воды и донных отложений проводился с борта лодки ПВХ в месте максимальной или средней глубины озер. Донные отложения отбирались с помощью стратометра С1. Для диатомового анализа использовался поверхностный слой (0.5-1 см) озерных отложений. Пробы воды для гидрохимического анализа отбирались на глубине 0.3-0.5 м от поверхности воды в 2014-2021 гг. Отбор дополнительных проб для определения содержания общего фосфора, азота и углерода проводился трижды за период с мая по октябрь 2021 г.

Гидрохимический анализ

Аналитические работы проведены в центре коллективного пользования ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Аттестат аккредитации № ААС.А.00330). Анализ катионов и анионов в воде выполнен в соответствии с традиционными методами гидрохимического анализа: сульфаты — гравиметрическим методом осаждения с $BaCl_2$; хлориды – титрованием с $AgNO_3$; Ca, Mg – атомно-абсорбционным методом в режиме ацетилен-воздух, K и Na – атомно-абсорбционным методом в эмиссионном режиме (Perkin Elmer 3110, США). Общая щелочность воды определена титрованием до значений pH 8.3 и 4.5, с

использованием полученных величин для расчетов массовых концентраций карбонатов и гидрокарбонатов. Жесткость воды определена комплексонометрическим методом. Содержания фосфатов и минеральных азотсодержащих веществ в воде определены фотометрическим методом. Содержание общего фосфора (TP) в воде измерено фотометрически после окисления персульфатом. Определение общего азота (TN) и углерода (TC), проводилось на анализаторе Toraz NC, принцип действия которого основан на высокотемпературном термokatалитическом окислении соединений азота и углерода, содержащихся в пробе воды, с последующим детектированием окислов элементов и вычислением исходного содержания в пробе всех форм соединений азота и углерода. Вариация гидрохимических параметров вычислена из средних данных анализа проб воды, отобранных в 2014-2021 гг. и представлена в Таблице 2.

Диатомовый анализ

Приготовление препаратов для диатомового анализа осуществлялось нагреванием со смесью азотной и хлорной кислот с последующей декантацией, 3-х кратным промыванием и центрифугированием. Препараты для светового микроскопа готовились с использованием среды Эляшева ($n=1.67—1.68$) (Диатомовые водоросли СССР..., 1974). Подсчет и определение видов диатомовых водорослей осуществлялся на световом микроскопе Микмед-6 вар. 7 при увеличении в 1000 раз. Уточнение таксономической принадлежности диатомей производилось с помощью электронной микроскопии (TE SCAN VEGA 3). Результаты диатомового анализа опубликованы в открытом доступе (Maslennikova, 2019; <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904673>) и подробно описаны в предыдущей публикации (Maslennikova, 2020).

Обработка данных гидрохимического и диатомового анализа

Для оценки трофического статуса озер использован трофический индекс состояния (TSI), рассчитанный на основе: а) прозрачности по диску Секки (SD) (Carlson, 1977):

$$TSI(SD) = 10 \cdot \left(6 - \frac{\ln(SD)}{\ln 2} \right)$$

б) содержания TP в озерной воде (Carlson, 1977):

$$TSI(TP) = 10 \cdot \left(6 - \frac{\ln\left(\frac{48}{TP}\right)}{\ln 2} \right)$$

в) содержания TN в озерной воде (Kratzer and Brezonik, 1981):

$$TSI(TN) = 54.45 + 14.43 \cdot \ln(TN)$$

Данные анализа диатомовых комплексов введены в программу Omnidia v. 6.1.4. для расчета 23 диатомовых индексов (Табл. 1) (Lecointe et al., 1993). Перед статистической обработкой гидрохимические параметры (за исключением pH) были логарифмически преобразованы для приведения к нормальному распределению. Индексы диатомовых водорослей, коррелирующие с гидрохимическими переменными, были разделены на группы с помощью кластерного анализа (евклидово расстояние, метод полной связи). Для определения статистической значимости величин диатомовых индексов озер различного трофического статуса выполнен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и тест Тьюки для неравных выборок. Корреляционный, дисперсионный и кластерный анализ проведены с помощью программы Statistica v.10.0.

Результаты

Изученные озера расположены в горах и предгорьях степной и лесной зоны восточного макросклона Южного и Среднего Урала. Химический состав вод изменяется от гидрокарбонатного кальциевого в северных районах до гидрокарбонатно-хлоридного натриевого в юго-восточных районах изученной территории (Табл. 2). Согласно индексам трофического состояния, рассчитанным на основе средних данных содержания общего азота (TSI(TN)), общего фосфора (TSI(TP)) и глубины по диску Секки (TSI(SD)), трофический статус изученных озер Южного и Среднего Урала варьирует от олиготрофного до гипертрофного (Табл. П1 в Приложении). Сравнение трофических индексов TSI(TN) и TSI(TP) показало, что наименьшие значения в большинстве случаев характерны для трофического индекса, рассчитанного по фосфору. По азоту были лимитированы только некоторые эвтрофные и гипертрофные озера. Трофический индекс, определенный, на основе прозрачности по диску Секки, для большинства озер имел значительно более низкие значения, чем TSI(TN) и TSI(TP). Концентрация общего азота, фосфора, органического углерода (TOC), перманганатная окисляемость, электропроводность (ЕС), pH, общая щелочность и жесткость повышались, а TN/TP понижалось при повышении трофического статуса озер.

В поверхностных отложениях 72 озер Урала было определено 327 видов и разновидностей диатомовых водорослей. Список видов и данные об обилии диатомей находятся в открытом доступе (<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904675>).

В результате анализа корреляции между гидрохимическими параметрами 72 озер Урала и диатомовыми индексами, мы исключили 9 индексов, имеющих слабую или

отсутствующую корреляцию с переменными, связанными с концентрацией биогенных элементов в воде. Корреляционная матрица представлена в приложении (Табл. П2). Оставшиеся 14 индексов были распределены по четырем группам на основе кластерного анализа матрицы коэффициентов корреляции (рис. 2). Все эти индексы, за исключением WAT связаны между собой.

1. В первую группу объединены индексы, имеющие корреляцию только с одним гидрохимическим параметром. Так, WAT обратно коррелирует с цветностью озерных вод, а TDI имеет умеренную положительную ($r=0.5$) связь с отношением общего азота к общему фосфору летней воды.

2. Во вторую группу входят SHE, Rott SI, EPI-D и Sla, которые характеризуются сильной корреляцией ($r=-0.7$) с ЕС и с одной или несколькими переменными, ассоциирующими с эвтрофированием или органическим загрязнением. Так, помимо ЕС, индексы Sla и EPI-D коррелируют с TP, TN и TOC. SHE имеет значимую связь с общим органическим азотом (TON), а Rott SI с TP летней воды.

3. Третья группа включает диатомовые индексы, имеющие сильную корреляцию не только с ЕС, но и с рН, а также с несколькими переменными, связанными с концентрацией биогенных элементов. Так, P.SI, Rott TI и IPS обратно коррелируют с нитратами, общим органическим азотом и углеродом, а IDG с TOC весенней и осенней воды. Кроме того, Rott TI имеет обратную связь с TP летней воды.

4. Четвертая группа (DI-CH, IDS/E, CEE и IBD) включает диатомовые индексы умеренно коррелирующие ($r=-0.5$) с содержанием TP в летней воде и слабо связанные ($r=-0.3-0.4$) с ЕС и TON.

Группы олиготрофных и гипертрофных озер, выделенных на основе значений TSI(TP), включают всего несколько озер (Табл П2 в Приложении). Поэтому для определения статистически значимых отличий значений индексов озер различного трофического статуса, использовались только группы эвтрофных и мезотрофных озер. После проверки на нормальное распределение значений диатомовых индексов отдельно для групп эвтрофных и мезотрофных озер, было выполнено попарное сравнение с помощью теста Тьюки. Установлены статистически значимые ($p<0.05$) различия между абсолютными значениями IBD, IPS, CEE, Sla, SHE, EPID, DI-CH, P SI и Rott TI озер эвтрофного и мезотрофного статуса. Различия величин индексов IDSE, WAT, TDI, IDG и Rott SI для эвтрофных и мезотрофных озер были незначимы.

Дискуссия

Большинство рассматриваемых диатомовых индексов получены на основе диатомового анализа бентосных сообществ, отобранных с речных субстратов. Несмотря на то, что методика отбора проб для диатомового анализа озер Урала значительно отличалась и, отобранные нами донные отложения включали в себя комплекс видов, накопленный за несколько лет, 14 диатомовых индексов оказались информативными для оценки динамики качества воды. Данный результат соответствует выводу, согласно которому субстрат влияет на состав диатомового сообщества, но не влияет на оценку качества воды с помощью диатомовых индексов (Richards et al., 2020; Trbojević et al., 2021).

Индексы TDIL, и EPI-L, разработанные специально для оценки экологического статуса озерных, а не речных экосистем, показали отсутствие или очень слабую корреляцию с гидрохимическими параметрами, в частности, с концентрациями биогенных элементов в воде озер Урала. Объяснением может служить то, что TDIL и EPI-L основаны на сравнительно небольшом количестве видов (247 и 90 соответственно) (Stenger-Kovács et al., 2007; Marchetto and Sforzi, 2018) и не содержат информацию о многих видах, представленных в диатомовых комплексах донных отложений озер Урала. Данное объяснение подходит и к другим индексам, которые оказались неинформативными для уральских озер. Так, при расчете индексов Descy, IDAP, Lobo, TDIL, TDI4, LTDI2, PDI и EPI-L (Табл 1), часто отсутствовала экологическая информация более чем для 50% видов, составляющих диатомовые сообщества изученных озер Урала.

Изучение диатомовых индексов Северной Америки, проведенное путем сравнения результатов, полученных на основе баз данных регионального и национального масштаба, показало важность регионального подхода для получения точной оценки качества воды (Potarova and Charles, 2007). В то же время определена информативность диатомовых индексов, разработанных для одних регионов, при оценке экологического состояния водных экосистем удаленных территорий (Taylor et al., 2009; Хазанова, 2014; Srivastava et al., 2017; Tan et al., 2017; Wondmagegn et al., 2019; Solak et al., 2020). Наши результаты подтверждают возможность использования индексов, разработанных для Великобритании и различных стран Европы на территории Урала. Однако основным условием для корректных результатов является хорошая представленность (>60% видов, составляющих >60% обилия сообщества) анализируемого сообщества диатомей в базе данных диатомового индекса.

В то же время, даже при соблюдении данного условия абсолютные значения индексов могут отличаться. Рассмотрим это на примере индексов IBD, IPS и IDG, которые удовлетворяли «условию 60%» для всех 72 озер. Отличия абсолютных значений индексов, преобразованных в шкалу от 1 до 20 в программе Omnidia 6.1.4., могут быть связаны с тем, что одни и те же таксоны, используемые в диатомовых индексах, отличаются по чувствительности к загрязнению, либо же присутствуют в одних, но отсутствуют в других базах данных, что вызывает несовпадающие значения (Besse-Lototskaya et al., 2011; Antón-Garrido et al., 2013). Так, например, доминирование *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen в диатомовых комплексах озер Сугомак, Окункуль, Ургун, Аятское и Исетское, привело к значительно более низким значениям индекса IBD, в сравнении с индексами IDG и IPS. Полученные нами данные также подтверждают вывод, согласно которому индексы, основанные на экологии рода, могут значительно отличаться по абсолютным значениям от индексов, основанных на экологии вида (Prygiel et al., 1996; Marchetto and Sforzi, 2018). Например, для оз. Карабалык, характерно существенное занижение индекса, основанного на экологии рода (IDG=10), в сравнении со значением индекса, основанного на экологии вида (IPS=16.6). Данное несоответствие связано с доминированием в сообществе *Nitzschia denticula* Grunow. Этот вид характеризуется сильной чувствительностью (4) к загрязнению, согласно системе IPS. В то же время, род *Nitzschia* характеризуется слабой чувствительностью (1) к загрязнению в системе IDG. Поэтому значение IDG более низкое, характерное для озерных экосистем с более высоким трофическим статусом и более высоким органическим загрязнением.

Кроме того, завышение и занижение значений диатомовых индексов озер, может быть связано с присутствием в диатомовом сообществе видов, чувствительных в первую очередь к рН и ЕС, а не к содержанию биогенных элементов. Например, существенная роль *Stauriforma exiguiformis* (Lange-Bertalot) R.J.Flower, V.J.Jones & Round в диатомовом комплексе эвтрофного оз. Щитовское существенно занижала трофический статус, определенный на основе диатомовых индексов. Так, согласно значениям индексов Rott Tl (Rott et al., 1999) и Sla (по таблице связи зон сапробности и разрядов трофности в Оксийок и др., 1993) озеро имеет мезотрофный статус, а значение EPI-D (по таблице связи зон сапробности и трофического статуса в Varinova, 2017) указывает на олиготрофный статус. *Stauriforma exiguiformis* считается видом, предпочитающим олиготрофные (Van Dam et al., 1994) и олиго-мезотрофные условия (Carayon et al., 2019). В то же время, данный вид обитает только в водоемах с низкими

значениями ЕС и pH (Lange-Bertalot et al., 2017). Общим для озер Южного Урала с большой долей участия *Stauroforma exiguiformis* является не содержание биогенных элементов, а низкие значения электропроводности озерных вод. Эти рассуждения соответствуют выводу, полученному на основе сравнения трофических баллов одних и тех же видов у различных диатомовых индексов, указывающему на необходимость целостного подхода вместо оценки диатомовых водорослей исключительно в качестве показателя градиента биогенных элементов (Besse-Lototskaya et al., 2011). Поэтому при экологической оценке важно учитывать возможное влияние на диатомовое сообщество, а следовательно и на значение диатомового индекса, нескольких переменных. Корреляция многих диатомовых индексов, не только с биогенными элементами, но и с ЕС и pH, предполагает необходимость количественной оценки изменения различных гидрохимических параметров для лучшего понимания динамики диатомового индекса при палеолимнологических реконструкциях. Это необходимо учитывать и в случае с оценкой качества воды озер при мониторинговых исследованиях.

Заключение

На основе сравнения гидрохимических данных и подсчета диатомовых индексов для 72 озер Южного и Среднего Урала определено, что 14 из 23 диатомовых индексов трофности и (или) сапробности можно использовать для экологической оценки озер Урала, несмотря на то, что все эти индексы были разработаны для речных экосистем других регионов. К ним относятся диатомовые индексы, полученные для оценки экологического состояния рек Центральной Европы (Rott Tl, Rott Sl, P. Sl, SHE, Sla и DI-CH), Франции (IBD, IDG, IPS, CEE и IDS/E), Италии (EPI-D), Великобритании (TDI) и Японии (WAT).

Сделан вывод, что главным условием возможности использования диатомового индекса при экологической оценке или в палеолимнологических реконструкциях является, не регион исследования, не тип водной экосистемы, не субстрат и способ отбора проб, а наличие экологической информации о видах диатомового сообщества оцениваемого водного объекта в базе данных диатомового индекса.

Установлено, что абсолютные значения диатомовых индексов, рассчитанных на основе одного и того же диатомового комплекса, переведенные в общую шкалу от 1 до 20, могут отличаться. Это связано с тем, что экологическая информация по одним и тем же таксонам для разных индексов может варьировать, что и влияет на результат расчета.

Поскольку диатомовые индексы коррелируют не только с содержанием биогенных элементов, но и с ЕС и рН, при экологической оценке и палеолимнологических реконструкциях важно учитывать возможность влияния этих переменных. Поэтому для более точной оценки экологического состояния современного озера или динамики озерной экосистемы с помощью диатомовых индексов, необходимо измерение или количественные реконструкции данных параметров.

Благодарности

Благодарим Л.Г. Удачину, Л.В. Лапшину и Г.Ф. Лонцакову за выполнение гидрохимического анализа озер.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00071, <https://rscf.ru/project/21-17-00071/>).

Литература

Денисов Д. Б. Водорослевые сообщества в оценке качества вод Кольского Севера // Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием: Экологические проблемы северных регионов и пути их решения (г. Апатиты, 23-27 июня 2014 г) Апатиты, 2014. С. 156–160.

Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные /Ред. А. И. Прошкина-Лавренко). Спб.: Наука, 1974. 373 с.

Еремкина Т. В. Структура и функционирование фитопланктона озер северной части Увильдинской зоны (Челябинская область) в условиях антропогенного эвтрофирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Борок, 2010. 22 с.

Исакова Н. А. Оценка качества воды озера Большое Миассово с помощью перифитонных сообществ диатомовых водорослей (Южный Урал) // Альманах современной науки и образования. 2016. № 7(109). С. 36–39.

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. Гидробиологический Журнал. 1993. Т. 29, № 4, 62–77.

Русанов А. Г., Станиславская Е. В. Загрязнение рек Ладожского бассейна: оценка на основе диатомового индекса // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 1. С. 1–12.

Хазанова К. П. Биологический мониторинг и оценка качества вод реки Москвы по сообществу бентосных диатомовых водорослей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 1(4). С. 1039–1042.

Хазанова К. П., Ростанец Д. В., Хромов В. М. Методические особенности использования индекса IBD (Biological Diatom Index) в оценке качества вод водотоков с антропогенно трансформированным гидрологическим режимом // Материалы научной конференции (с международным участием): Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод (г. Ростов-на-Дону, 8-10 сентября 2015 г.). Ростов-на-Дону, 2015. С. 135–139.

Antón-Garrido B., Romo S., Villena M. J. Diatom species composition and indices for determining the ecological status of coastal Mediterranean Spanish lakes // *Anales Del Jardin Botanico De Madrid*. 2013. Vol. 70. P. 122–135. doi: 10.3989/AJBM.2373

Barinova S. Algal diversity dynamics, ecological assessment, and monitoring in the river ecosystems of the eastern Mediterranean. New York, USA: Nova Science Publishers, 2011. pp. 363

Barinova S. Essential and Practical Bioindication Methods and Systems for the Water Quality Assessment // *International Journal on Environmental Sciences*. 2017. Vol. 2, Issue 3. P. 1–10. doi: 10.19080/IJESNR.2017.02.555588

Besse-Lototskaya A. A., Verdonshot P. F. M., Coste M., Vijver B.V. Evaluation of European diatom trophic indices // *Ecological Indicators*. 2011. Vol. 11. P. 456–467. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.06.017

Carayon D., Tison-Rosebery J., Delmas F. Defining a new autoecological trait matrix for French stream benthic diatoms // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 103. P. 650–658. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.03.055

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22 P. 361–369. doi: 10.4319/LO.1977.22.2.0361

Cemagref. Etude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Cemagref, Division Qualité des Eaux, Lyon, 1982. pp. 218.

Coste M., Boutry S., Tison-Rosebery J., Delmas F. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006) // *Ecological Indicators*. 2009. Vol. 9, Issue 4. P. 621–650. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2008.06.003

Dell'Uomo A. Assessment of water quality of an apenninne river as a pilot study // *Use of algae for monitoring rivers* / Eds. Whitton B. A. and Rott E. Institut fur Botanik, Universitat Innsbruck, 1996. P. 17–25.

Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small Lakes Ecosystems under the Impact of Non-Ferrous Metallurgy (Russia, Murmansk Region) // *Environments*. 2020. Vol. 7, Issue 29. P. 1–13. doi: 10.3390/environments7040029

Descy J-P. 1979. A new approach to water quality estimation using diatoms // *Nova Hedwigia*. 1979. Vol. 64. P. 305–323.

Descy J-P., Coste M. 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms // *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. 1991. Vol. 24. P. 2112–2116. doi: [10.1080/03680770.1989.11899905](https://doi.org/10.1080/03680770.1989.11899905)

Gomez N., Licursi M. The Pampean Diatom Index (PDI) for assessment of rivers and streams in Argentina // *Aquatic Ecology*. 2001. Vol. 35. P. 173–181. doi: [10.1023/A:1011415209445](https://doi.org/10.1023/A:1011415209445)

Hürlimann J., Niederhauser. Méthode d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse: Diatomées - niveau R (région). Berne: Publié par l'Office fédéral de l'environnement OFEV, 2007. pp. 122.

Kelly M. G., Whitton B. A. The trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers // *Journal of Applied Phycology*. 1995. Vol. 7. P. 433–444. doi: [10.1007/BF00003802](https://doi.org/10.1007/BF00003802)

Kratzer C. R., Brezonik P. L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Glorid lakes // *Journal of The American Water Resources Association*. Vol. 17. P. 713–715. doi: [10.1111/J.1752-1688.1981.TB01282.X](https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1981.TB01282.X)

Lange-Bertalot H., Hofmann G., Werum M., Cantonati M. Freshwater Benthic Diatoms of Central Europe: Over 800 Common Species Used in Ecological Assessment. Kapellenbergstr: Koeltz botanical books, 2017. pp. 942.

Leclerco L., Lecointe C. Presentation de l'indice diatomique de saprobie-eutrophisation (IDSE) introduit dans la nouvelle version de Omnidia. 27 Colloque de l'ADLaF Dijon 1-4 Sept. 2008. Livre des, 2008.

Lecointe C., Coste M., Prygiel J. Omnidia: software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management // *Hydrobiologia*. 1993. Vol. 269/270. P. 509–513.

Lobo E. A., Bes D., Tudesque L., Ector L. Water quality assessment of the Pardinho River, RS, Brazil, using epilithic diatom assemblages and faecal coliforms as biological indicators // *Vie et Milieu Life and Environment*. 2004. Vol. 54. P. 115–125.

Marchetto A., Sforzi T. Using benthic diatoms for estimating lake ecological quality: Comparing different taxonomic resolution. *Advances in Oceanography and Limnology*. 2018. doi: [10.4081/aiol.2018.7389](https://doi.org/10.4081/aiol.2018.7389)

Maslennikova A. V. Southern and Middle Urals lakes diatom abundance and hydrochemistry. 2019. PANGAEA. doi: [10.1594/PANGAEA.904675](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904675)

Maslennikova A. V. Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia // *Journal of Paleolimnology*. 2020. Vol. 63, Issue 2. P. 129–146. doi: 10.1007/s10933-019-00106-z

Maslennikova A. V., Udachin V. N. Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies // *The Holocene*. 2017. Vol. 27, Issue 6. P. 847–859. doi: 10.1177/0959683616675942

Norme NF T90-354. Qualité de l'eau-Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD); Afnor La Plaine Saint-Denis Cedex: Saint-Denis, France, 2007.

Pfister P., Hofmann G., Ehrensperger G. Fließgewässer-Phytobenthos Überarbeitung des Trophie und Saprobie Bewertungssystems nach Rott et al. 1999, 1997. ARGE Limnologie; Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016. pp. 130.

Potapova M., Charles D. F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States // *Ecological Indicators*. 2007. Vol. 7. P. 48–70. doi: 10.1016/j.ecolind.2005.10.001

Prygiel J., Leveoue L., Iserentant R. Un nouvel indice diatomique pratique pour l'évaluation de la qualité des eaux en réseau de surveillance // *Revue des Sciences de l'Eau*. 1996. Vol. 9, Issue 1. P. 97–113.

Prygiel M., Coste M. Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'indice biologique diatomées NF T90-354. Agences de l'Eau, MATE, Cemagref Bordeaux, 2000. 134 pp.

Richards J., Tibby J., Barr C., Goonan P. Effect of substrate type on diatom-based water quality assessments in the Mount Lofty Ranges, South Australia // *Hydrobiologia*. 2020. Vol. 847. P. 3077–3090. doi: 10.1007/s10750-020-04316-9

Rott E., Hofmann G., Pall K., Pfister P., Pipp E. Indikationslisten für Aufwuchsalgen Teil 1: Saprobienne Indikation. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1997. pp. 73.

Rott E., Pipp E., Pfister P., Dam H. V., Orther K., Binder N., Pall K. Indikationslisten für Aufwuchsalgen in Österreichischen Fließgewässern. Teil 2: Trophieindikation. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1999. pp. 248.

Rumeau A., Coste M. Initiation à la systématique des Diatomées d'eau douce // *Bulletin Français De La Peche Et De La Pisciculture*. 1988. Vol. 309. P. 1-69. doi: 10.1051/KMAE:1988009

Sládeček V. Diatoms as indicators of organic pollution // *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*. 1986. Vol. 14. P. 555–566. doi: 10.1002/aheh.19860140519

Solak C. N., Peszek Ł., Yilmaz E., Ergül H. A., Kaya, M., Ekmekçi F., Várбірó G., Yüce A. M., Canli O., Binici M.S., Ács É. Use of Diatoms in Monitoring the Sakarya River Basin, Turkey // *Water*. 2020. Vol. 12. P. 703. doi: 10.3390/w12030703

Srivastava P., Grover S., Verma J., Khan A. S. Applicability and efficacy of diatom indices in water quality evaluation of the Chambal River in Central India // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24, Issue 33. P. 25955–25976. doi: 10.1007/s11356-017-0166-0

Steinberg C., Schiefele S. Biological indication of trophy and pollution of running waters // *Z. Wasser — Abwasser-Forsch.* 1988. Vol. 21. P. 227–234.

Stenger-Kovács C., Buczkó K., Hajnal É., Padisák, J. Epiphytic, littoral diatoms as bioindicators of shallow lake trophic status: Trophic Diatom Index for Lakes (TDIL) developed in Hungary // *Hydrobiologia*. 2007. Vol. 589. 141–154. doi: 10.1007/s10750-007-0729-z

Tan X., Zhang Q., Burford M. A., Sheldon F., Bunn S. E. Benthic Diatom Based Indices for Water Quality Assessment in Two Subtropical Streams. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8, Issue 601. P. 1-10. doi: 10.3389/fmicb.2017.00601

Taylor J. C., Vuuren M. J., Pieterse A. J. The application and testing of diatom-based indices in the Vaal and Wilge Rivers, South Africa // *Water SA*. 2009. Vol. 33. P. 51–59. doi: 10.4314/WSA.V33I1.47871

Trbojević I.S., Popović S.S., Milovanović V.V., Predojević D.D., Subakov Simić G.V., Jakovljević O.S., Krizmanić J.Ž. Substrate type selection in diatom based lake water quality assessment // *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2021. Vol. 422. P. 21 doi: 10.1051/kmae/2021022

Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands // *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*. 1994. Vol. 28. P. 117–133. doi: 10.1007/BF02334251.

Wondmagegn T., Mengistou S., Barker P.A. Testing of the applicability of European diatom indices in the tropical rift valley lake, Lake Hawassa, in Ethiopia // *African Journal of Aquatic Science*. 2019. Vol. 44, No 3. P. 209–217. doi: 10.2989/16085914.2019.1645640

Watanabe, T., Asai K., Houki A. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage-diatom assemblage index (DAI_{po}) // *Science of the Total Environment*. 1986. Vol. 55. P. 209-218. doi: 10.1016/0048-9697(86)90180-4

Water Framework Directive – United Kingdom Technical Advisory Group (WFD-UKTAG). Phytobenthos – Diatoms for Assessing River and Lake Ecological Quality (River DARLEQ2).

References

Denisov D. B. Vodoroslevye soobshchestva v ocenke kachestvo vod Kol'skogo Severa [Algal communities in the assessment of water quality of the Kola Peninsula] // Materials of the V All-Russian scientific conference with foreign participants: Ecological problems of Northern regions and ways for their solution. June 23-27th, 2014. Apatity, 2014. P. 156-160.

Diatomovye vodorosli SSSR. Iskopaemye i sovremennye [Diatoms of the USSR. Fossil and modern] / Proshkina-Lavrenko A. I. (Ed.) Vol. 1, Nauka Publ., St-Petersburg. 1974. pp. 373

Eremkina T. V. Struktura i funkcionirovanie fitoplanktona ozer severnoj chasti Uvil'dinskoj zony (Cheljabinskaja oblast') v uslovijah antropogennogo jevtrofirovaniya [Structure and functioning of phytoplankton of lakes in the northern part of the Uvilda zone (Chelyabinsk region) under conditions of anthropogenic eutrophication]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskikh nauk. Borok, 2010. pp. 22.

Isakova N. A. Ocenka kachestva vody ozera Bol'shoe Miassovo s pomoshh'ju perifitonnyh soobshhestv diatomovyh vodoroslej (Juzhnyj Ural) [Assessment of the water quality of Lake Bolshoe Miassovo with the help of peripheral communities of diatoms (Southern Urals)] // Al'manah sovremennoj nauki i obrazovaniya. 2016. № 7(109). P. 36–39.

Oksijuk O. P., Zhukinsky V. N., Braginskiy L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I. Kompleksnaja ekologicheskaja klassifikacija kachestva poverhnostnykh vod sushi [Complex ecological classification of surface water quality]. *Gidrobiologicheskij Zhurnal*. 1993. Vol. 29, Issue 4, P. 62–77.

Rusanov A. G., Stanislavskaya E. V. River Pollution in Ladoga Basin: Estimation Based on Diatom Index // *Water resources*. 2011. vol. 38, No. 1. pp. 95-106. doi: 10.1134/S0097807811010118

Hazanova K. P. Biologicheskij monitoring i ocenka kachestva vod reki Moskvy po soobshhestvu bentosnyh diatomovyh vodoroslej [Biological monitoring and assessment of the quality of the waters of the Moscow River by the community of benthic diatoms] // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2014. Vol. 16, Issue 1(4). P. 1039–1042.

Hazanova K. P., Rostanec D. V., Hromov V. M. Metodicheskie osobennosti ispol'zovaniya indeksa IBD (Biological Diatom Index) v ocenke kachestva vod vodotokov s

antropogenno transformirovannym gidrologicheskim rezhimom [Methodological features of the use of the IBD index (Biological Diatom Index) in assessing the water quality of watercourses with anthropogenically transformed hydrological regime] / Materialy nauchnoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem): Sovremennye problemy gidrohimii i monitoringa kachestva poverhnostnyh vod (Rostov-na-Donu, September 8-10th, 2015). Rostov-na-Donu, 2015. P. 135–139.

Antón-Garrido B., Romo S., Villena M. J. Diatom species composition and indices for determining the ecological status of coastal Mediterranean Spanish lakes // *Anales Del Jardin Botanico De Madrid*. 2013. Vol. 70. P. 122–135. doi: 10.3989/AJBM.2373

Barinova S. Algal diversity dynamics, ecological assessment, and monitoring in the river ecosystems of the eastern Mediterranean. New York, USA: Nova Science Publishers, 2011. pp. 363

Barinova S. Essential and Practical Bioindication Methods and Systems for the Water Quality Assessment // *International Journal on Environmental Sciences*. 2017. Vol. 2, Issue 3. P. 1–10. doi: 10.19080/IJESNR.2017.02.555588

Besse-Lototskaya A. A., Verdonshot P. F. M., Coste M., Vijver B.V. Evaluation of European diatom trophic indices // *Ecological Indicators*. 2011. Vol. 11. P. 456–467. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.06.017

Carayon D., Tison-Rosebery J., Delmas F. Defining a new autoecological trait matrix for French stream benthic diatoms // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 103. P. 650–658. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.03.055

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22 P. 361–369. doi: 10.4319/LO.1977.22.2.0361

Cemagref. Etude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Cemagref, Division Qualité des Eaux, Lyon, 1982. pp. 218.

Coste M., Boutry S., Tison-Rosebery J., Delmas F. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006) // *Ecological Indicators*. 2009. Vol. 9, Issue 4. P. 621–650. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2008.06.003

Dell'Uomo A. Assessment of water quality of an apenninne river as a pilot study // *Use of algae for monitoring rivers* / Eds. Whitton B. A. and Rott E. Institut fur Botanik, Universitat Innsbruck, 1996. P. 17–25.

Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small Lakes Ecosystems under the Impact of Non-Ferrous Metallurgy (Russia, Murmansk Region) // *Environments*. 2020. Vol. 7, Issue 29. P. 1–13. doi: 10.3390/environments7040029

Descy J-P. 1979. A new approach to water quality estimation using diatoms // *Nova Hedwigia*. 1979. Vol. 64. P. 305–323.

Descy J-P., Coste M. 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms // *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. 1991. Vol. 24. P. 2112–2116. doi: [10.1080/03680770.1989.11899905](https://doi.org/10.1080/03680770.1989.11899905)

Gomez N., Licursi M. The Pampean Diatom Index (PDI) for assessment of rivers and streams in Argentina // *Aquatic Ecology*. 2001. Vol. 35. P. 173–181. doi: [10.1023/A:1011415209445](https://doi.org/10.1023/A:1011415209445)

Hürlimann J., Niederhauser. Méthode d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse: Diatomées - niveau R (région). Berne: Publié par l'Office fédéral de l'environnement OFEV, 2007. pp. 122.

Kelly M. G., Whitton B. A. The trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers // *Journal of Applied Phycology*. 1995. Vol. 7. P. 433–444. doi: [10.1007/BF00003802](https://doi.org/10.1007/BF00003802)

Kratzer C. R., Brezonik P. L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Glorid lakes // *Journal of The American Water Resources Association*. Vol. 17. P. 713–715. doi: [10.1111/J.1752-1688.1981.TB01282.X](https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1981.TB01282.X)

Lange-Bertalot H., Hofmann G., Werum M., Cantonati M. Freshwater Benthic Diatoms of Central Europe: Over 800 Common Species Used in Ecological Assessment. Kapellenbergstr: Koeltz botanical books, 2017. pp. 942.

Leclerco L., Lecointe C. Presentation de l'indice diatomique de saprobie-eutrophisation (IDSE) introduit dans la nouvelle version de Omnidia. 27 Colloque de l'ADLaF Dijon 1-4 Sept. 2008. Livre des, 2008.

Lecointe C., Coste M., Prygiel J. Omnidia: software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management // *Hydrobiologia*. 1993. Vol. 269/270. P. 509–513.

Lobo E. A., Bes D., Tudesque L., Ector L. Water quality assessment of the Pardinho River, RS, Brazil, using epilithic diatom assemblages and faecal coliforms as biological indicators // *Vie et Milieu Life and Environment*. 2004. Vol. 54. P. 115–125.

Marchetto A., Sforzi T. Using benthic diatoms for estimating lake ecological quality: Comparing different taxonomic resolution. *Advances in Oceanography and Limnology*. 2018. doi: [10.4081/aiol.2018.7389](https://doi.org/10.4081/aiol.2018.7389)

Maslennikova A. V. Southern and Middle Urals lakes diatom abundance and hydrochemistry. 2019. PANGAEA. doi: [10.1594/PANGAEA.904675](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904675)

Maslennikova A. V. Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia // *Journal of Paleolimnology*. 2020. Vol. 63, Issue 2. P. 129–146. doi: 10.1007/s10933-019-00106-z

Maslennikova A. V., Udachin V. N. Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies // *The Holocene*. 2017. Vol. 27, Issue 6. P. 847–859. doi: 10.1177/0959683616675942

Norme NF T90-354. Qualité de l'eau-Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD); Afnor La Plaine Saint-Denis Cedex: Saint-Denis, France, 2007.

Pfister P., Hofmann G., Ehrensperger G. Fließgewässer-Phytobenthos Überarbeitung des Trophie und Saprobie Bewertungssystems nach Rott et al. 1999, 1997. ARGE Limnologie; Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016. pp. 130.

Potapova M., Charles D. F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States // *Ecological Indicators*. 2007. Vol. 7. P. 48–70. doi: 10.1016/j.ecolind.2005.10.001

Prygiel J., Leveoue L., Iserentant R. Un nouvel indice diatomique pratique pour l'évaluation de la qualité des eaux en réseau de surveillance // *Revue des Sciences de l'Eau*. 1996. Vol. 9, Issue 1. P. 97–113.

Prygiel M., Coste M. Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'indice biologique diatomées NF T90-354. Agences de l'Eau, MATE, Cemagref Bordeaux, 2000. 134 pp.

Richards J., Tibby J., Barr C., Goonan P. Effect of substrate type on diatom-based water quality assessments in the Mount Lofty Ranges, South Australia // *Hydrobiologia*. 2020. Vol. 847. P. 3077–3090. doi: 10.1007/s10750-020-04316-9

Rott E., Hofmann G., Pall K., Pfister P., Pipp E. Indikationslisten für Aufwuchsalgen Teil 1: Saprobienne Indikation. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1997. pp. 73.

Rott E., Pipp E., Pfister P., Dam H. V., Orther K., Binder N., Pall K. Indikationslisten für Aufwuchsalgen in Österreichischen Fließgewässern. Teil 2: Trophieindikation. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1999. pp. 248.

Rumeau A., Coste M. Initiation à la systématique des Diatomées d'eau douce // *Bulletin Français De La Peche Et De La Pisciculture*. 1988. Vol. 309. P. 1-69. doi: 10.1051/KMAE:1988009

Sládeček V. Diatoms as indicators of organic pollution // *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*. 1986. Vol. 14. P. 555–566. doi: 10.1002/aheh.19860140519

Solak C. N., Peszek Ł., Yilmaz E., Ergül H. A., Kaya, M., Ekmekçi F., Várбірó G., Yüce A. M., Canli O., Binici M.S., Ács É. Use of Diatoms in Monitoring the Sakarya River Basin, Turkey // *Water*. 2020. Vol. 12. P. 703. doi: 10.3390/w12030703

Srivastava P., Grover S., Verma J., Khan A. S. Applicability and efficacy of diatom indices in water quality evaluation of the Chambal River in Central India // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24, Issue 33. P. 25955–25976. doi: 10.1007/s11356-017-0166-0

Steinberg C., Schiefele S. Biological indication of trophy and pollution of running waters // *Z. Wasser — Abwasser-Forsch.* 1988. Vol. 21. P. 227–234.

Stenger-Kovács C., Buczkó K., Hajnal É., Padisák, J. Epiphytic, littoral diatoms as bioindicators of shallow lake trophic status: Trophic Diatom Index for Lakes (TDIL) developed in Hungary // *Hydrobiologia*. 2007. Vol. 589. 141–154. doi: 10.1007/s10750-007-0729-z

Tan X., Zhang Q., Burford M. A., Sheldon F., Bunn S. E. Benthic Diatom Based Indices for Water Quality Assessment in Two Subtropical Streams. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8, Issue 601. P. 1-10. doi: 10.3389/fmicb.2017.00601

Taylor J. C., Vuuren M. J., Pieterse A. J. The application and testing of diatom-based indices in the Vaal and Wilge Rivers, South Africa // *Water SA*. 2009. Vol. 33. P. 51–59. doi: 10.4314/WASA.V33I1.47871

Trbojević I.S., Popović S.S., Milovanović V.V., Predojević D.D., Subakov Simić G.V., Jakovljević O.S., Krizmanić J.Ž. Substrate type selection in diatom based lake water quality assessment // *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2021. Vol. 422. P. 21 doi: 10.1051/kmae/2021022

Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands // *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*. 1994. Vol. 28. P. 117–133. doi: 10.1007/BF02334251.

Wondmagegn T., Mengistou S., Barker P.A. Testing of the applicability of European diatom indices in the tropical rift valley lake, Lake Hawassa, in Ethiopia // *African Journal of Aquatic Science*. 2019. Vol. 44, No 3. P. 209–217. doi: 10.2989/16085914.2019.1645640

Watanabe, T., Asai K., Houki A. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage-diatom assemblage index (DAIpo) // *Science of the Total Environment*. 1986. Vol. 55. P. 209-218. doi: 10.1016/0048-9697(86)90180-4

Water Framework Directive – United Kingdom Technical Advisory Group (WFD-UKTAG). Phytobenthos – Diatoms for Assessing River and Lake Ecological Quality (River DARLEQ2).

Табл. 1. Список диатомовых индексов, рассчитанных в программе Omnidia 6.1.4 (Lecointe et al., 1993), ссылки на литературу с описанием методики их расчета и список территорий, на которых проводились исследования для получения диатомовых индексов.

Table 1. List of diatom indices calculated in the Omnidia 6.1.4 (Lecointe et al., 1993), references describing the methods of their calculation and a list of regions where diatom indices were developed.

Диатомовый индекс	Полное название диатомового индекса	Ссылка	Территория
IBD	Диатомовый биологический индекс	Prygiel and Coste, 2000; Norme NF T90-354, 2007; Coste et al., 2009	Франция
IPS	Специфический индекс чувствительности к загрязнению	Cemagref, 1982	Франция
IDG	Родовой диатомовый индекс	Cemagref, 1982; Rumeau and Coste, 1988	Франция
Descy	Индекс Дески	Descy, 1979	Бельгия, Франция
Sla	Индекс Сладечека	Sladeczek, 1986	Центральная Европа
IDS/E	Диатомовый индекс Луи-Леклерка	Leclercq and Lecointe, 2008	Франция
IDAP	Диатомовый индекс Артуа-Пикарди	Prygiel et al., 1996	Франция
EPI-D	Индекс эвтрофикации/загрязнения	Dell'Uomo, 1996	Италия
Lobo	Индекс Лобо	Lobo et al., 2004	Бразилия
DI-CH	Швейцарский диатомовый индекс	Hürlimann and Niederhauser, 2007	Швейцария
Rott TI	Трофический индекс Ротта	Rott et al., 1999	Австрия
Rott SI	Индекс сапробности Ротта	Rott et al., 1997	Австрия
TDIL	Трофический диатомовый индекс для озер	Stenger-Kovacs et al., 2007	Венгрия
CEE	Диатомовый индекс Дески и Косте	Descy and Coste, 1991	Бельгия, Франция
WAT (DAI _{pro})	Индекс Ватанабе (Диатомовый индекс органического загрязнения)	Watanabe et al., 1986	Япония
TDI	Трофический диатомовый индекс	Kelly and Whitton, 1995	Великобритания
PDI	Диатомовый индекс Пампы	Gomez and Licursi, 2001	Аргентина

Продолжение Таблицы 1.

Диатомовый индекс	Полное название диатомового индекса	Ссылка	Территория
SHE	Индекс Штейнберга-Шефеле	Steinberg and Schiefele, 1988	Германия
P.TI	Трофический индекс	Pfister et al., 2016	Австрия
P.SI	Индекс сапробности	Pfister et al., 2016	Австрия
TDI4	Трофический диатомовый индекс	Water Framework Directive	Великобритания
LTDI2	Озерный трофический диатомовый индекс	Water Framework Directive	Великобритания
EPI-L	Озерный индекс эвтрофикации/загрязнения	Marchetto and Sforzi, 2018	Италия

Таблица 2. Гидрохимические и морфометрические параметры озер Южного и Среднего Урала. Max — максимальное значение, Min — минимальное значение, Mean — среднее взвешенное, Median — медиана. Список озер и координаты точек отбора проб опубликованы в открытом доступе (<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904663>)

Table 2. Hydrochemical and morphometric parameters of the Southern and Middle Urals lakes. Max is the maximum value, Min is the minimum value, Mean is the weighted average. List of lakes and samples coordinates are available in PANGAEA site: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904663>

Код	Название	Единица измерения	Max	Min	Mean	Median
pH			9.4	6.8	8.2	8.2
ЕС	Электропроводность	МкСм/см	4453	63	554	258
Alk	Общая щелочность	Ммоль/дм ³	18	0.2	4.3	2.5
NH ⁴⁺	Аммоний	мг/дм ³	1.4	0.04	0.25	0.27
NO ₂ ⁻	Нитриты	мг/дм ³	0.06	0.001	0.01	0.006
NO ₃ ⁻	Нитраты	мг/дм ³	1.9	0.05	0.4	0.36
PO ₄ ³⁻	Фосфаты	мг/дм ³	0.2	0.004	0.02	0.01
Цветность	Цветность	градусы Сг-Со шкалы	273	9	38	28
Pv	Перманганатная окисляемость	мг О/дм ³	38	2.7	13	11
ТН	Жесткость	ммоль/дм ³	27	0.6	4.6	2.8
ТР	Общий фосфор	мкг/л	203	8.9	27	39
TN	Общий азот	мкг/л	5750	327	1007	1283
TN/ТР	Отношение общего азота к фосфору		89	14	42	41
ТС	Общий углерод	мг/л	237	9.6	44	69
ТОС	Общий органический углерод	мг/л	98.8	5.7	22.7	28.5
Hmax	Максимальная глубина	м	34	1.2	5.7	4.7
S	Площадь озера	км ²	62	0.2	8	4.8
SD	Глубина по диску Секки	м	10	0.3	2.3	2.0

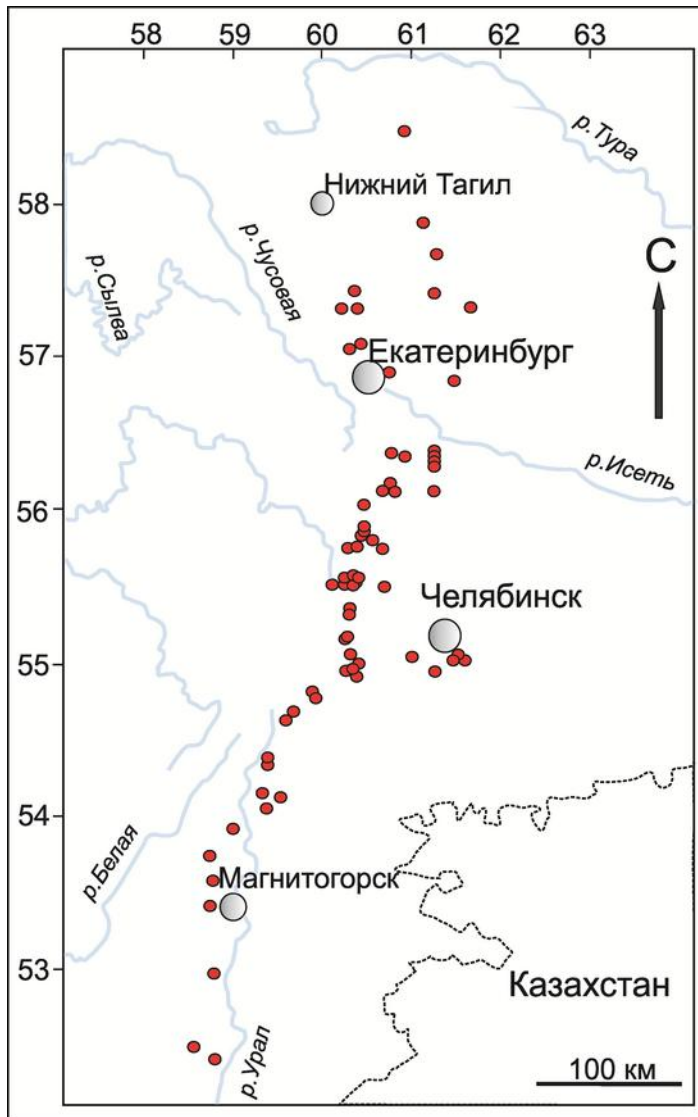


Рис. 1. Карта-схема расположения изученных озер Южного и Среднего Урала. Список озер и координаты точек отбора проб опубликованы в открытом доступе (<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904663>)

Fig. 1. Location of Southern and Middle Urals lakes considered in this study. List of lakes and samples coordinates are available in PANGAEA site: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.904663>

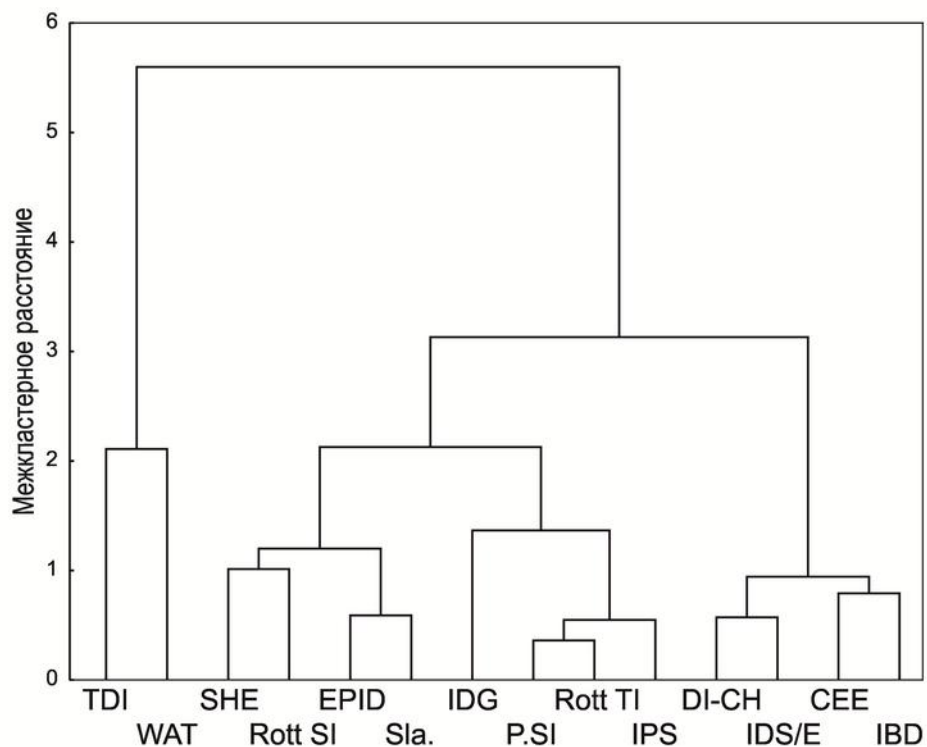


Рис. 2. Диаграмма кластерного анализа (евклидово расстояние, метод полной связи), полученная на основе матрицы коэффициентов корреляции между диатомовыми индексами и гидрохимическими параметрами 72 озер Южного и Среднего Урала. Список полных названий индексов приведен в Табл. 1

Fig. 2. Cluster analysis diagramm (euclidean distance, complete lincage), obtained based on correlation matrix between diatom indices and hydrochemical parameters of 72 lakes of the Southern and Middle Urals. Indices full names are listed in Table 1.