

И. А. Терентьева, Н. А. Кашулин, Д. Б. Денисов

Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра

Объектом исследования данной работы является озеро Имандра – самый большой водоем Мурманской области. Водоем в течение длительного времени подвержен многофакторному влиянию предприятий горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности региона, азротехногенного загрязнения и энергетики. Кроме того, значителен вклад поступления коммунально-бытовых вод крупных населенных пунктов, расположенных на территории его водосбора. В результате в озере накопилось значительное количество загрязняющих и биогенных веществ, что привело к увеличению токсической нагрузки на водоем. Одной из основных экологических проблем стала интенсификация процессов антропогенного эвтрофирования. Целью данного исследования было оценить современный трофический статус озера Имандра с помощью трофического индекса (TSI) по среднегодовым значениям параметров: хлорофилла, азота общего, фосфора общего, общего органического углерода и проследить динамику изменений за более чем 20-летний период наблюдения. Изучение трофического состояния плесов озера Имандра за период 1991–2013 гг. производилось с использованием индексов трофического состояния, разработанных Карлсоном, Кратзером и Брезоником, Дунальской. Согласно рассчитанным значениям индексов плес Большая Имандра занимает эвтрофно-мезотрофный трофический статус, плес Йокостровская Имандра можно охарактеризовать как мезотрофный. Плес Бабинская Имандра, испытывающий наименьшую биогенную нагрузку, близок к олиготрофному трофическому статусу, но из-за влияния промышленных, хозяйственно-бытовых и подогретых вод КАЭС есть районы с мезотрофным состоянием. Поэтому данный плес также занимает переходное положение – с мезо-олиготрофным трофическим статусом. В настоящее время для всех изученных плесов лимитирующим фактором развития водорослей является азот. На основе математической модели Фолленвайдера для плесов озера рассчитаны величины критических фосфорных нагрузок, позволяющие контролировать поступление такого важного биогенного элемента как фосфор.

Ключевые слова: индекс трофического состояния, общий фосфор, общий азот, хлорофилл а, общий органический углерод, эвтрофирование.

Введение

Озеро Имандра является самым большим водоемом Мурманской области, имеющим сложную морфологию с достаточно обширной водосборной территорией, на которой расположены крупнейшие населенные пункты и промышленные предприятия региона (рис.). Изначально по природным характеристикам водоем имел статус ультра-олиготрофного. Исследуемое озеро в течение длительного времени подвержено влиянию азротехногенного загрязнения, стоков предприятий горнодобывающей и горнорудной промышленности, цветной металлургии, энергетики, транспорта. Кроме того, значителен вклад поступления бытовых сточных вод населенных пунктов [1]. В результате в озере накопилось значительное количество загрязняющих и биогенных веществ, что привело к изменениям в гидрохимическом режиме. Произошло перераспределение содержания основных ионов. Озеро Имандра в природном состоянии относилось к классу гидрокарбонатов, в 2000-х гг. соответствовало классу сульфатов. Существенно увеличилась минерализация водоема [2]. Также произошли серьезные изменения в гидрологическом режиме озера после строительства каскада Нивских ГЭС, приведших к зарегулированию стока и образованию водохранилища [2]. Одной из основных проблем в настоящее время является интенсификация эвтрофирования исследуемого водоема. Это подтверждается регулярным цветением потенциально-токсичных водорослей, в том числе и цианобактерий, сопровождающееся гибелью рыб [3].

Трофический статус водоема – это интегральная характеристика, определяемая множеством взаимосвязанных физико-химических и биологических процессов, происходящих в водной экосистеме [4]. Определение трофности водоема включает использование комплекса параметров (концентрация биогенных элементов, продуктивность фауны и флоры водоема, наличие кислорода, морфометрия озера), дополняющих друг друга, и является важным шагом в исследовании любого водоема [5]. К сожалению, использование такого количества параметров не всегда возможно. По этой причине был выбран индекс трофического состояния (Trophic State Index – TSI), благодаря которому возможно определение трофического состояния водоема по небольшому числу показателей. Определение трофии водоема по классификационным шкалам позволяет рассматривать этот показатель не только в современном состоянии, но и оценить его динамические изменения. Примером является нумерическая шкала, предложенная Р. Карлсоном (1977). В основу расчета трофического индекса Карлсона положены тесные корреляции между параметрами водоема: прозрачностью, содержанием хлорофилла а и общего фосфора [6].

Достоинство нумерических шкал состоит в условности численного выражения от 0 до 100 непрерывного ряда трофических состояний. Каждые 10 единиц в пределах этой системы представляют 1/2 увеличения в глубине диска Секки; около 1/3 увеличения концентрации хлорофилла; удвоение количества общего фосфора [7].

В 1981 г. Кратцер и Брезоник, пытаясь исследовать сезонную лимитированность азотом озер, внесли дополнительный параметр в расчет трофического индекса Карлсона, основанный на концентрации общего азота [8]. Увеличивающееся загрязнение окружающей среды приводит к изменениям в величине и качестве органического вещества, следовательно, общий органический углерод (ТОС) может быть использован как один из важнейших индикаторов продуктивности водоемов. В 2011 г. польский ученый Дунальска рассчитала трофический индекс, основанный на концентрации общего органического углерода (ТОС), что позволяет оценить метаболизм в экосистеме озера [9]. Индекс трофического состояния, предложенный Карлсоном (1977) и дополненный Кратцером и Брезоником (1981), не теряет своей актуальности и в настоящее время и довольно часто используется для характеристики водоемов [5; 10–12]. Цель данного исследования – оценить современный трофический статус озера Имандра с помощью трофического индекса (TSI) и проследить динамику изменений за более чем 20-летний период наблюдения, а также рассчитать величину критической фосфорной нагрузки.

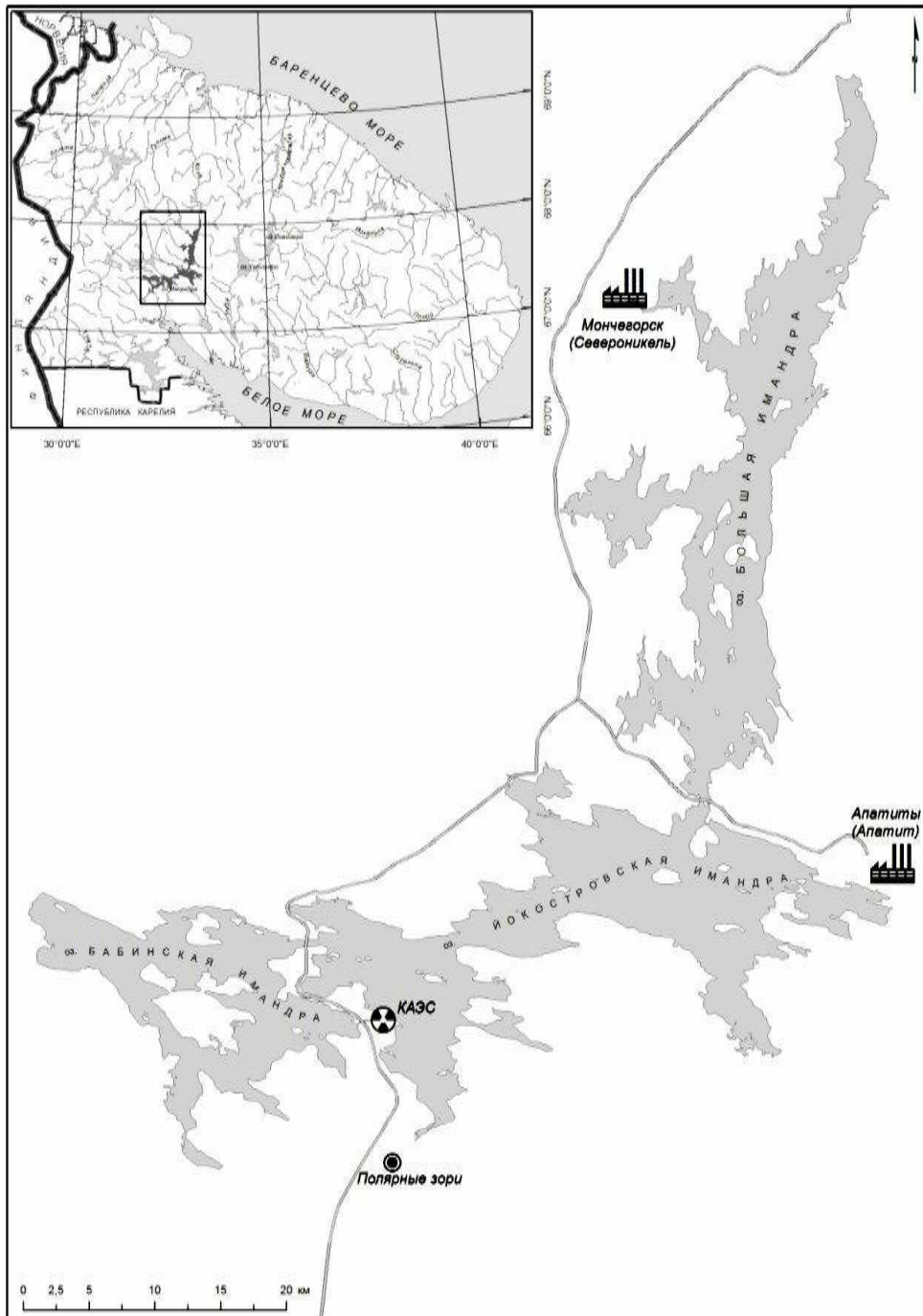


Рис. Карта-схема расположения озера Имандра и основных промышленных предприятий
 Fig. Schematic map of location of Imandra Lake and major industrial enterprises

Материалы и методы

Озеро Имандра состоит из трех обособленных плесов: Большая Имандра, Йокостровская Имандра и Бабинская Имандра, соединяющихся между собой узкими проливами-салмами. Основные морфологические и гидрологические параметры исследуемых плесов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические характеристики оз. Имандра [13]
Table 1. Morphometric characteristics of Imandra Lake

Показатель	плес Большая Имандра	плес Йокостровская Имандра	плес Бабинская Имандра	озеро Имандра
Длина по оси, км	54.7	44.6	21.4	109
Общая площадь, км ²	327.5	361.9	191.0	880.4
S зеркала, км ²	311.6	352.2	148.7	812.5
Макс. глубина, м	67	42	43.5	67
Средняя глубина, м	14.7	10.9	16.3	13.9
Объем воды, км ³	4.58	3.85	2.43	10.86
S водосбора, км ²	4992.5	6070	1237.5	12300

Отбор проб для гидрохимического анализа производился пластиковым батометром с поверхностного и придонного горизонтов. Химический анализ проб воды проводился в Центре коллективного пользования физико-химических методов анализа при ИППЭС КНЦ РАН согласно аккредитованным методикам. Определение основных биогенных элементов, использующихся в данной работе, осуществлялось следующими методами:

- общий азот – фотометрическим методом после окисления персульфатом калия;
- общий фосфор – фотометрическим методом после окисления персульфатом калия;
- общий органический углерод рассчитан на основе зависимости: $TOC = 0.764 \times PO + 1.55$ [14], где PO – перманганатная окисляемость, определяемая титриметрическим методом.

Анализ содержания хлорофилла а был проведен с использованием стандартных рекомендованных методик, принятых в практике гидробиологических исследований, по схеме, принятой в ИППЭС КНЦ РАН¹ [15; 16]. Для определения концентрации хлорофиллов пробы воды объемом 1–2 л фильтровались через мембранный фильтр с диаметром пор 0.47 мкм. Экстракция хлорофиллов проводилась раствором ацетона (90 % ЧДА), оптическая плотность экстрактов измерялась на спектрофотометре Hitachi UV-VIS 181.

В данной работе для оценки трофического статуса плесов озера был использован трофический индекс состояния (TSI): формула 1 и 2 [6], формула 3 [8], формула 4 [9]. В качестве индикаторов трофического состояния использованы следующие переменные: среднегодовые содержания общего фосфора (TP) – мкг/дм³, общего азота (TN) – мг/дм³, хлорофилла а (Chla) – мг/м³, концентрация общего органического углерода (TOC) – мг/дм³. Расчет индексов производился по следующим формулам:

$$TSI (Chla) = 30.6 + 9.81 \times \ln (Chla); \quad (1)$$

$$TSI (TP) = 4.15 + 14.427 \times \ln (TP); \quad (2)$$

$$TSI (TN) = 54.45 + 14.43 \times \ln (TN); \quad (3)$$

$$TSI (TOC) = 20.59 + 15.71 \times \ln (TOC). \quad (4)$$

Согласно шкале (табл. 2) олиготрофному состоянию водоема соответствует величина $TSI < 40$, мезотрофному $TSI = 40–50$, эвтрофному – от 50 до 70, а гипертрофному – > 70 .

Таблица 2. Трофический индекс и связанные с ним параметры [6; 8; 9]
Table 2. Trophic index and related parameters

Трофический уровень	Прозрачность, м	Общий фосфор TP, мкг/дм ³	Хлорофилл а Chl а, мг/м ³	Общий азот, мг/дм ³	Общий органический углерод TOC, мг/дм ³	TSI
Олиготрофный	> 4.0	< 12	< 2.6	< 0.37	< 3.4	< 40
Мезотрофный	2.0–4.0	12–24	2.6–6.4	0.37–0.74	3.4–6.5	40–50
Эвтрофный	0.5–2.0	24–96	6.4–55.5	0.74–2.94	6.5–23.2	50–70
Гиперэвтрофный	< 0.5	> 96	> 55.5	> 2.94	> 23.2	> 70

В работе использованы архивные данные за период 1991–1999 гг. и первичные данные, полученные в ходе полевых исследований в период 2000–2013 гг., представленные в табл. 3.

¹ ГОСТ 17.1.4.02–90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М., 2003. С. 587–600.

Таблица 3. Средние значения содержаний хлорофилла а (Chla, мг/м³), общего фосфора (TP, мкг/дм³), общего азота (TN, мг/дм³), общего органического углерода (TOC, мг/дм³) в плесах озера Имандра в различные годы

Table 3. The average contents of chlorophyll a (Chla, mg/m³), total phosphorus (TP, µg/dm³), total nitrogen (TN, mg/dm³), total organic carbon (TOC, mg/dm³) of Imandra Lake in different years

Периоды	Большая				Йокостровская				Бабинская			
	Chl a	TP	TN	TOC	Chl a	TP	TN	TOC	Chl a	TP	TN	TOC
1991–1994	1.96	36	0.420	3.8	1.76	19	0.287	3.7	1.36	18	0.649	3.8
1995–2000	3.49	34	0.235	4.1	3.06	21	0.183	3.4	3.51	8	0.475	3.9
2001–2006	5.5	49	0.335	4.0	5.07	17	0.208	3.6	–	6	0.129	4.1
2009–2013	3.5	46	0.380	3.7	3.9	20	0.212	3.5	1.86	6	0.149	3.9

Результаты и обсуждение

В ходе исследования были проанализированы данные за период с 1991 по 2013 гг. и рассчитаны значения для каждого из рассматриваемых индексов с помощью формул (1–4). Исследуемый промежуток наблюдений был разбит на следующие периоды: 1991–1994 гг.; 1995–2000 гг.; 2001–2006 гг.; 2009–2013 гг.

Результаты расчетов по оценке трофического состояния исследованных плесов водоема приведены в табл. 4. Анализ результатов показал, что трофические индексы по параметрам TSI_{Chl}, TSI_{TN}, TSI_{TP}, TSI_{TOC} отличаются. Диапазон индекса TSI_{Chl} в исследуемых плесах за период наблюдения варьировал от 34 до 47. В случае индекса TSI_{TN} – от 25 до 48, а для TSI_{TOC} находился в диапазоне от 40 до 43. Значение индекса, рассчитанного на основании концентрации общего фосфора, было выше (для плесов Большая и Йокостровская Имандра), чем индексы, вычисленные на основе других параметров, и варьировало от 30 до 60. Аналогичные результаты получены для польских озер [5; 9]. Трофическое состояние плеса Большая Имандра по TSI_{Chl}, TSI_{TN}, TSI_{TOC} можно охарактеризовать как мезотрофное, но по индексу общего фосфора TSI_{TP} – как эвтрофное. Исследование по оценке зоопланктонных сообществ данного плеса: отмечали районы с мезотрофным и эвтрофным трофическим статусом [17]. Оценка трофии Йокостровской Имандры по индексу общего азота позволяет отнести плес к олиготрофному, но по остальным параметрам (TSI_{Chl}, TSI_{TP}, TSI_{TOC}) – мезотрофному типу. Плес Бабинская Имандра по TSI_{Chl}, TSI_{TN}, TSI_{TP} характеризуется как олиготрофный водоем, по TSI_{TOC} – как мезотрофный. При рассмотрении водорослевых сообществ этот плес в зависимости от сезонной выборки также характеризуют то как мезотрофный, то как олиготрофный водоем [18].

Такая вариабельность индексов, полученная в данном исследовании, затрудняет правильность понимания трофического состояния водоема. В этом случае нельзя опираться только на один из параметров, так как водоем – сложная система, требующая учета многих факторов.

Таблица 4. Динамика трофического состояния плесов озера Имандра

Table 4. Dynamics of the trophic status of Imandra Lake

Периоды	Большая				Йокостровская				Бабинская			
	TSI (Chl)	TSI (TP)	TSI (TN)	TSI (TOC)	TSI (Chl)	TSI (TP)	TSI (TN)	TSI (TOC)	TSI (Chl)	TSI (TP)	TSI (TN)	TSI (TOC)
1991–1994	37	56	42	42	36	47	36	41	34	46	48	42
1995–2000	43	55	34	43	42	48	30	40	43	34	44	42
2001–2006	47	60	39	42	47	45	32	41	–	30	25	43
2009–2013	43	59	40	41	44	47	32	40	37	30	27	42

Теоретически рассчитанные значения индексов должны быть одинаковыми. Вычитание из индекса TSI (Chl) других индексов TSI (TN или TP) должно быть равно нулю или около него. На практике обычно индексы отличаются. Информация об отклонении между индексами может быть использована для оценки, какой из биогенных элементов выступает лимитирующим фактором. Были получены зависимости, при которых наступает тот или иной ограничивающий фактор [19].

Азотное лимитирование наступает при соблюдении следующих условий:

- 1) TSI (Chl) – TSI (TN) > 0;
- 2) TSI (TN) < TSI (TP).

В свою очередь при соблюдении нижеприведенных условий рост фитопланктона будет ограничивать биогенный элемент – фосфор:

- 1) TSI (Chl) – TSI (TP) > 0;
- 2) TSI (TN) > TSI (TP).

Для плеса Большая Имандра с 1995 по 2013 гг. и для плеса Йокостровская Имандра с 1991 по 2013 гг. согласно вышеприведенным условиям характерно азотное лимитирование; для плеса Бабинская Имандра до 2000 г. лимитирующим биогенным элементом являлся фосфор, но с 2001 по 2013 гг. ограничивающим компонентом стал азот. Цветению азотфиксирующих цианобактерий предшествует резкое снижение в эпилимнионе концентрации минерального азота, и этот элемент становится существенным сдерживающим фактором, влияющим на скорость роста других видов водорослей.

Поскольку фосфорный индекс TSI_{TR} значительно отличался от других рассчитанных индексов (TSI_{Chl} , TSI_{TN} , TSI_{TOC}) в плесе Большая Имандра, а в Йокостровской Имандре имел более высокие значения, то следующим этапом исследования было решено провести оценку критической фосфорной нагрузки на плесы оз. Имандра. Зависимость трофического уровня водоема и количества поступающего в него фосфора позволяют проследить реакцию водоема, что проявляется в изменении положения водоема на трофической шкале. Согласно модели Фолленвайдера рассчитана величина фосфорной нагрузки ($L_{кр}$, гP/м²×год), позволяющая водоему оставаться в олиготрофном состоянии [20]. В качестве стандартного параметра используется средняя глубина водоема ($H_{ср}$, м).

$$L_{кр} = 0.025 \times H_{ср}^{0.6}.$$

Результаты расчетов величин фосфорной нагрузки приведены в табл. 5.

Таблица 5. Величины критической фосфорной нагрузки для плесов оз. Имандра
Table 5. The critical phosphorus load value for Imandra Lake

Плесы	Средняя глубина, $H_{ср}$, м	Площадь плесов, км ²	$L_{кр}$, гP/м ² ×год	Критическая нагрузка, тP/год
Большая	14.7	327.5	0.125	41
Йокостровская	10.9	361.9	0.105	38
Бабинская	16.3	191	0.133	25

Заключение

В ходе исследований установлено, что полученные результаты оценки трофического состояния водоема с помощью индекса трофического состояния хорошо согласуются с результатами, полученными другими исследователями с использованием других параметров. Согласно рассчитанным значениям индексов плес Большая Имандра занимает эвтрофно-мезотрофный трофический статус, плес Йокостровская Имандра можно охарактеризовать как мезотрофный. Плес Бабинская Имандра, испытывающий наименьшую биогенную нагрузку, близок к олиготрофному трофическому статусу, но из-за влияния промышленных, хозяйственно-бытовых и подогретых вод КАЭС есть районы с мезотрофным состоянием. Поэтому данный плес также занимает переходное положение – с мезо-олиготрофным трофическим статусом.

В условиях значительных различий трофических индексов Карлсоном рекомендовано использовать для оценки трофического состояния индекс хлорофилла (TSI_{Chl}), так как он основан непосредственно на биомассе водорослей. Однако много трофических моделей озер основаны на измерении концентрации фосфора в водной толще водоема. Поэтому недооценивать трофический индекс TSI_{TR} при изучении трофического состояния озера, в сравнении с TSI_{Chl} было бы ошибочно. Особенно влияние фосфорной нагрузки необходимо учитывать для чувствительных олиготрофных озер. На примере крупнейшего субарктического водоема оз. Имандра с использованием расчетной модели Фолленвайдера было установлено, что для снижения трофии исследуемых водоемов критическая фосфорная нагрузка для плеса Большая Имандра не должна превышать 41 тонн/год, для Йокостровской – 34 тонн/год, для Бабинской Имандры – 22 тонн/год.

Использование индекса на основе содержания общего органического углерода также необходимо учитывать при изучении трофического состояния озера. Он позволяет оценить уровень обмена веществ и энергии в экосистеме водоема. На примере исследованного плеса Бабинская Имандра в современном состоянии, являющегося по основным гидробиологическим и гидрохимическим параметрам олиготрофным водоемом, показано, что оно по содержанию органического вещества является мезотрофным.

Таким образом, авторы рекомендуют использовать индекс TSI_{Chl} для оценки продуктивности водоема, TSI_{TOC} – для контроля метаболических процессов в экосистеме озера, а TSI_{TR} и TSI_{TN} – для выявления лимитирующего фактора развития водорослевых сообществ. Использование всех перечисленных индексов позволяет анализировать как кратковременные, так и долгосрочные изменения трофических условий в озере.

Полученные результаты показали необходимость контроля поступления биогенных веществ и важность дальнейших наблюдений за происходящими в этих плесах гидрохимическими и гидробиологическими процессами. Для снижения трофического статуса водоемов Большой и Йокостровской Имандры необходима обязательная доочистка поступающих в эти объекты коммунально-бытовых и промышленных стоков.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории № 22 водных экосистем Центра коллективного пользования физико-химических методов анализа при Институте проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

Библиографический список

1. Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М. Современные тенденции изменения пресноводных экосистем Евро-арктического региона. Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. 2012. Вып. 1. С. 6–53.
2. Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Лукин А. А., Кудрявцева Л. П. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М. : Наука, 2002. 403 с.
3. Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Кашулин А. Н. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 98–107.
4. Wetzel R. G. Limnology. Lake and River Ecosystems. Academic Press, San Diego, California. 2001. P. 1006.
5. Jarosiewicz A., Ficek D., Zapadka T. Eutrophication parameters and Carlson-type trophic state indices in selected Pomeranian lakes. Limnological Review. 2011. P. 15–23.
6. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22, N 22. P. 361–369.
7. Dodds W. K., Jones J. R., Welch E. B. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen and phosphorus. Water Res. 1998. V. 32. P. 1455–1462.
8. Kratzer C. R., Brezonik P. L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida Lakes. Water Res. Bull. 1981. V. 17. P. 713–715.
9. Dunalska J. Total organic carbon as a new index for monitoring trophic states in lakes. J. Oceanography and Hydrobiology. 2011. V. 20. P. 112–115.
10. Фруммин Г. Т., Жань-Жань Хуан. Динамика трофического состояния озера Тайху // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 21. С. 32–37.
11. Al-Haidarey M., Abdumunem I., Abbas M., Al-Ansari N. The trophic state index of Bahr Al-Najaf depression reservoir. J. Environmental Hydrology. 2016. N 24. P. 1–10.
12. Bekteshi A., Cupi A. Use of trophic state index for assessment of trophic status of Shkodra Lake // J. Environmental Protection and Ecology. 2014. V. 15, N 1. P. 359–365.
13. Рихтер Г. Д. Очерк исследования района оз. Имандра // Труды Мурманской биологической станции. 1926. Т. 2, вып. 1. С. 32–68.
14. Henriksen A., Kamari I., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters // AMBIO. 1992. P. 356–363.
15. Минеева Н. М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М. : Наука, 2004. 156 с.
16. Determination of photosynthetic pigments in sea water : monography / Rep. of SCOP-UNESCO Working Group 17. Paris, UNESCO, 1966. P. 9–18.
17. Вандыш О. И., Черепанов А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Влияние стоков горнорудного производства на зоопланктонное сообщество губы Белой оз. Имандра // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 48–62.
18. Денисов Д. Б., Кашулин Н. А. Современное состояние водорослевых сообществ планктона в зоне влияния Кольской АЭС (оз. Имандра) // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2013. № 3 (16). С. 70–96.
19. Matthews R., Hilles M., Pelletier G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation // Hydrobiologia. 2002. V. 468. P. 107–121.
20. Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. 1968. V. 27. 159 p.

References

1. Kashulin N. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M. Sovremennyye tendentsii izmeneniya presnovodnykh ekosistem Evro-arkticheskogo regiona [Modern trends in freshwater ecosystems in Euro-Arctic region]. Trudy KNTs RAN. Prikladnaya ekologiya Severa. 2012. Vyp. 1. P. 6–53.
2. Moiseenko T. I., Dauvalter V. A., Lukin A. A., Kudryavtseva L. P. Antropogennyye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra [Anthropogenic modifications of the ecosystem of Imandra Lake]. M. : Nauka, 2002. 403 p.
3. Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Kashulin A. N. Nekotorye aspekty sovremennogo sostoyaniya presnovodnykh resursov Murmanskoy oblasti [Some aspects of the present state of freshwater resources of the Murmansk region] // Vestnik MGTU. 2013. V. 16, N 1. P. 98–107.

4. Wetzel R. G. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Academic Press, San Diego, California. 2001. P. 1006.
5. Jarosiewicz A., Ficek D., Zapadka T. Eutrophication parameters and Carlson-type trophic state indices in selected Pomeranian lakes. *Limnological Review*. 2011. P. 15–23.
6. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. 1977. V. 22, N 22. P. 361–369.
7. Dodds W. K., Jones J. R., Welch E. B. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen and phosphorus. *Water Res.* 1998. V. 32. P. 1455–1462.
8. Kratzer C. R., Brezonik P. L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida Lakes. *Water Res. Bull.* 1981. V. 17. P. 713–715.
9. Dunalska J. Total organic carbon as a new index for monitoring trophic states in lakes. *J. Oceanography and Hydrobiology*. 2011. V. 20. P. 112–115.
10. Frumin G. T., Zhan-Zhan Huan. Dinamika troficheskogo sostoyaniya ozera Tayhu [The dynamics of the trophic state of Lake Taihu] // *Uchenye zapiski RGGMU*. 2011. N 21. P. 32–37.
11. Al-Haidarey M., Abdumunem I., Abbas M., Al-Ansari N. The trophic state index of Bahr Al-Najaf depression reservoir. *J. Environmental Hydrology*. 2016. N 24. P. 1–10.
12. Bekteshi A., Cupi A. Use of trophic state index for assessment of trophic status of Shkodra Lake // *J. Environmental Protection and Ecology*. 2014. V. 15, N 1. P. 359–365.
13. Rihter G. D. Ocherk issledovaniya rayona oz. Imandra [Essay on the study of the area of Imandra Lake] // *Trudy Murmanskoy biologicheskoy stantsii*. 1926. V. 2, vyp. 1. P. 32–68.
14. Henriksen A., Kamari I., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters // *AMBIO*. 1992. P. 356–363.
15. Mineeva N. M. Rastitelnye pigmenty v vode volzhskih vodohranilisch [Plant pigments in the water of the Volga reservoirs]. M. : Nauka, 2004. 156 p.
16. Determination of photosynthetic pigments in sea water : monography / Rep. of SCOP-UNESCO Working Group 17. Paris, UNESCO, 1966. P. 9–18.
17. Vandysh O. I., Cherepanov A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Vliyanie stokov gornorudnogo proizvodstva na zooplanktonnoe soobshchestvo guby Beloy oz. Imandra [The influence of mining production waste water on zooplankton community in the Belay Bay of Imandra Lake] // *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015. N 1. P. 48–62.
18. Denisov D. B., Kashulin N. A. Sovremennoe sostoyanie vodoroslevykh soobshchestv planktona v zone vliyaniya Kolskoy AES (oz. Imandra) [The phytoplankton communities under the Kola nuclear power Plant impact (Imandra Lake)] // *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Prikladnaya ekologiya Severa*. 2013. N 3 (16). P. 70–96.
19. Matthews R., Hilles M., Pelletier G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation // *Hydrobiologia*. 2002. V. 468. P. 107–121.
20. Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // *Tech. Rep. Organiz.* 1968. V. 27. 159 p.

Сведения об авторах

Терентьева Ингрида Андреевна – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: terentjeva@inep.ksc.ru

Terent'eva I. A. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: terentjeva@inep.ksc.ru

Кашулин Николай Александрович – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией; e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

Kashulin N. A. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Biol. Sci., Professor, Head of Laboratory; e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

Денисов Дмитрий Борисович – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; e-mail: denisow@inep.ksc.ru

Denisov D. B. – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. of Biol. Sci., Associate Professor, Senior Researcher; e-mail: denisow@inep.ksc.ru

I. A. Terent'eva, N. A. Kashulin, D. B. Denisov

Estimate of the trophic status of subarctic Imandra Lake

The object of study is Imandra Lake – the largest reservoir of the Murmansk region. The lake is being influenced by the long-term and multi-factorial activities of mining and ore processing industries, air pollution and energetics. Moreover, the drain of municipal sewage from the large settlements situated on the lake's watershed makes a serious contribution to water pollution. As a result the lake has accumulated a significant amount of pollutants and nutrients that resulted currently in an increase of the toxic load on the lake system. One of the main ecological problems also is the intensification of the anthropogenic eutrophication processes. The aim of this study is to evaluate the current trophic status of Imandra Lake using the trophic index (TSI) with the average annual values of the parameters: chlorophyll, total nitrogen, total phosphorus, and total organic carbon and to find the dynamics of these parameters' changes during more than 20-year period. The study of the trophic status of Imandra Lake has been performed for the period 1991–2013 yrs. using the trophic state index developed by Carlson, Kratzer and Bresonik, Dunalska. According to the calculated values of the indexes Bolshaja Imandra Lake corresponds to eutrophic-mesotrophic trophic status, Yokostrovskaya Imandra Lake could be described as mesotrophic. Babinskaja Imandra Lake that subjected to essential nutrient loading is close to the oligotrophic trophic status. However, some parts of Babinskaja Imandra Lake refer to the mesotrophic state due to influence of industrial, household and heated water of the Kola atomic power station. Thus, this part of Imadra Lake could be considered as a meso-oligotrophic status. It has been established that currently nitrogen is a limiting factor for development of algae in Imandra Lake. Based on the mathematical Vollenweider model the critical phosphorus loading values to control such an important nutrient element as phosphorus have been calculated.

Key words: trophic state index, total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll a, total organic carbon, eutrophication.