

ГИДРОБИОЛОГИЯ И ИХТИОЛОГИЯ

УДК 551.312.1:556.55 (571.56)

ДИАТОМОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОДОГРЕТЫХ ВОД КОЛЬСКОЙ АЭС

Д. Б. Денисов, В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН

Исследованы диатомовые комплексы донных отложений оз. Имандра (Кольский полуостров) в зоне влияния подогретых вод Кольской АЭС, проанализированы ответные реакции диатомей на изменение условий среды, выделены основные этапы развития водоема, реконструированы параметры среды (рН, сапробность). Показано, что влияние термического загрязнения наиболее ярко проявилось на современном этапе развития водоема. Выявлены последствия климатических изменений после окончания Малого ледникового периода.

Ключевые слова: диатомовый анализ; донные отложения; палеолимнология; субарктический водоем; тепловое загрязнение.

D. B. Denisov, V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin. DIATOM COMPLEXES OF THE IMANDRA LAKE SEDIMENTS IN THE AREA AFFECTED BY HEATED WATER FROM THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT

Diatom assemblages in Lake Imandra sediments (Kola Peninsula) were investigated in the area affected by heated discharges from the Kola NPP. Diatoms responses to the environmental changes were analyzed; the main stages in the lake ecosystem development were revealed; the water characteristics (pH, saprobity) were reconstructed by diatoms models. It is shown that the influence of thermal pollution has been the most conspicuous at the present stage of the lake development. The consequences of climatic changes since the Little Ice Age were revealed.

Key words: diatom analysis; sediments; paleolimnology; subarctic lake; thermal pollution.

Введение

Долговременные изменения водных экосистем Евро-Арктического региона под влиянием

многофакторного промышленного загрязнения происходят на фоне глобальных и локальных климатических изменений [Кашулин и др., 2013]. Температура является одним из

основных факторов, регулирующих развитие водоемов высоких широт: именно температурный режим во многом определяет направление и скорость гидрохимических и гидродинамических процессов, продолжительность периода открытой воды, динамику продукционных процессов. Экосистемные последствия антропогенной трансформации качества вод в сочетании с изменением климатической системы региона регистрируются в водоемах различного типа [Денисов, 2010, 2012; Денисов, Кашулин, 2013]. В первую очередь это проявляется в виде массового развития водорослей, включая потенциально токсичные формы цианобактерий, как результат нарушения циклов биогенных элементов, что представляет особую опасность для водоемов, являющихся источником питьевого водоснабжения.

Анализ происходящих изменений не представляется возможным без знания характера исторической динамики параметров водоемов и данных о вкладе климатических факторов в трансформацию водных экосистем. Палеолимнологические исследования на базе диатомового анализа представляют собой конкретный инструмент для реконструкции истории развития водоемов, позволяющий оценить последствия изменений климата и окружающей среды, антропогенного загрязнения, а также реконструировать ряд основных параметров, характеризующих качество вод.

Период непосредственной регистрации гидрохимических и гидробиологических параметров водоемов на Кольском Севере сравнительно невелик, кроме того, полученные ряды данных характеризуются дискретностью, вызванной различием в периодах отбора проб. Поэтому анализ современных трендов различных параметров водных экосистем целесообразно сочетать с результатами палеоэкологических реконструкций. Изучению климатических изменений на базе диатомового анализа посвящено множество работ [Пазумовский, Гололобова, 2008; Gaiser, Rühland, 2010; Paul et al., 2010], широко развернулись также исследования долговременных последствий трансформаций водных экосистем под влиянием различных антропогенных факторов [Moiseenko et al., 2000]. В то же время сравнительно немного информации об исторических изменениях озер-охладителей под влиянием так называемого теплового загрязнения, связанного с деятельностью атомных электростанций [Каган, 2001; Антропогенные модификации..., 2002]. Это направление в палеоэкологии представляется весьма перспективным в настоящее время, как элемент моделирования

изменений температуры и связанных с этим процессов в водных экосистемах, результаты которого могут быть использованы при анализе последствий глобального и локального потепления климата.

Материалы и методы

Исследования были проведены на озере Имандра – крупнейшем заполярном озере европейской части России, являющемся одним из основных источников пресной воды для населенных пунктов и промышленных предприятий Кольского полуострова. Площадь озера – 880,4 км², площадь водосбора – 12 300 км². Водоем состоит из трех обособленных плесов – Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра, – соединенных между собой узкими проливами (рис. 1). Сравнительная изолированность плесов определяет значимые различия в гидрохимических и гидробиологических характеристиках их вод [Антропогенные модификации..., 2002; Даувальтер, Кашулин, 2013].

Экосистема водоема претерпела существенные изменения с 30-х годов XX века, когда начались добыча и переработка апатитового сырья и рост городов. С 1934 г. озеро было зарегулировано в результате строительства ГЭС «Нива-II», что привело к нарушению естественных колебаний уровня воды. В 1939 году на берегах водоема начало работу медно-никелевое производство – был запущен комбинат «Североникель»; в 1950 г. началась добыча и переработка железных руд Оленегорским ГОК (см. рис. 1). Долговременная антропогенная нагрузка, связанная с поступлением сточных вод металлургической и апатитовой промышленности, а также хозяйственно-бытовых стоков, привела к изменению качества вод и к перестройке структурно-функциональных характеристик экосистемы водоема.

Наименее трансформированной частью озера долгое время считался плес Бабинская Имандра, гидрохимические и гидробиологические параметры которого были близки к фоновым. Ситуация изменилась после ввода в эксплуатацию Кольской АЭС. Строительство станции сопровождалось перегораживанием пролива Узкая Салма дамбой для предотвращения поступления подогретых вод обратно в Йокостровскую Имандру, что изменило не только температурный режим, но и картину течений и гидродинамические процессы в озере. Кольская АЭС для охлаждения своих реакторов забирает воду из Йокостровской Имандры и сбрасывает по каналу в Молочную губу Бабинской Имандры в год около

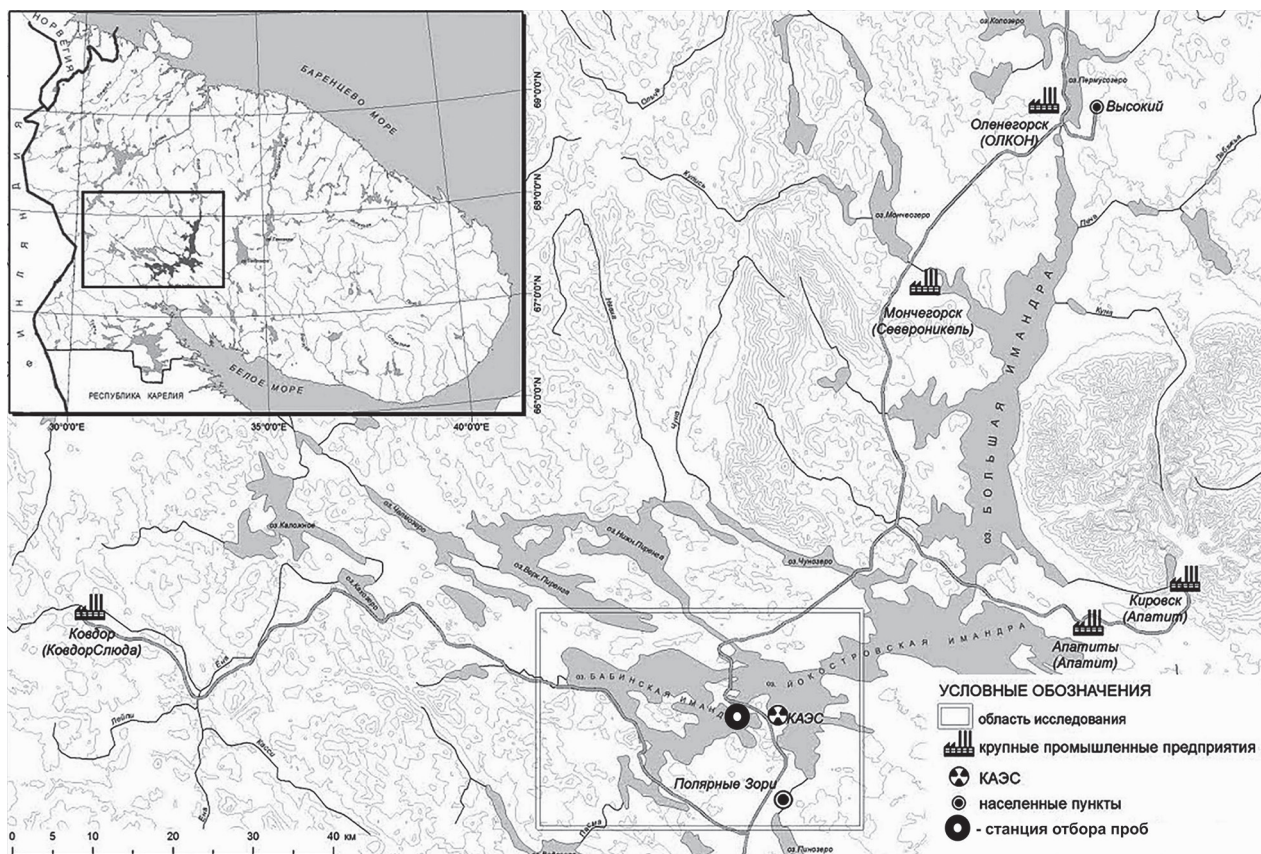


Рис. 1. Карта-схема района исследований и станция отбора проб

1 345 млн м³ ($\approx 42,62$ м³/с) сточных вод, подогретых на 5–13 °С в зависимости от сезона [Доклад..., 2009].

Отбор проб донных отложений (ДО) состоялся в период экспедиционных работ в июле 2011 года в губе Молочная плеса Бабинская Имандра (см. рис. 1). Выбор станции (N67°28'04,81"; E32°21'59,89") был обусловлен благоприятными условиями седиментации, отвечающими требованиям стратиграфического изучения. По сравнению с предыдущими исследованиями [Каган, 2001] отбор был произведен в зоне аккумуляции отложений на более глубоком участке – 17,7 м, чтобы избежать влияния течения и анализа принесенного с током канала материала. Расстояние от станции отбора до устья сбросного канала КАЭС – около 4 км (см. рис. 1). Примерно в 1,5 км на север от станции отбора располагался пролив Узкая Салма, соединяющий плесы Йокостровская и Бабинская Имандра, который был перекрыт дамбой при строительстве КАЭС в 1973 году.

Колонки ДО были получены при помощи пробоотборника открытого гравитационного типа (внутренний диаметр трубки 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой [Skogheim, 1979] и ненарушенными транспортировались в лабораторию для дальнейших

анализов. Всего отобрано две колонки ДО мощностью 18 и 20 см. Часть проб (колонка ДО мощностью 20 см) использовались для анализа химического состава отложений и послыной динамики концентраций различных элементов. Определение содержания элементов в ДО проводилось по методике, разработанной И. В. Родюшкиным [1995] с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (AAS-30, Perkin-Elmer).

Концентрации элементов в ДО служили в качестве маркера, иллюстрирующего начало антропогенного загрязнения и позволяющего косвенно определить возраст отложений [Даувальтер, 2002; Денисов, 2012].

Для изучения диатомовых комплексов была использована колонка ДО мощностью 18 см. Диатомовый анализ донных отложений проводился по стандартной общепринятой методике [Диатомовый анализ..., 1949; Давыдова, 1985; Денисов и др., 2006; Денисов, 2007; Кашулин и др., 2008], по схеме, используемой в ИППЭС КНЦ РАН [Косова и др., 2011]. Колонки были разделены на слои мощностью 1 см, которые и послужили материалом для всех видов анализа. Все обнаруженные в препаратах створки водорослей определялись по возможности до внутривидовых таксономических

Некоторые средние гидрохимические и гидробиологические показатели плеса Бабинская Имандра в разные годы

Показатель	Период исследований		
	1972–1982	1993–1998	2011
Chl a, мг/м ³	-	3,47	3,79
Chl b, мг/м ³	-	2,99	1,01
Chl c, мг/м ³	-	1,81	2,03
В(фито), г/м ³	-	1,45	1,62
O ₂ , мг/л	-	-	11,3
pH	6,86	7,21	7,16
Электропроводность (20 °С), мкСм/см	-	62	55
Щелочность мкэкв/л	-	-	275
Цветность, °Pt	-	20	9
Органическое вещество, мгС/л	-	-	3,4
P _{общ} , мкг/л	-	6	5
N _{общ} , мкг/л	-	108	103
Ca, мг/л	3,71	3,73	3,50
Na, мг/л	4,55	6,99	5,95
K, мг/л	1,25	1,36	1,36
Sr, мкг/л	-	54	50
SO ₄ ²⁻ , мг/л	4,0	11,8	9,0
NO ₃ ⁻ , мкгN/л	-	15	38
PO ₄ ³⁻ , мкгP/л	-	1	1
NH ₄ ⁺ , мкгN/л	-	15	21
Cl ⁻ , мг/л	1,08	2,84	2,19
Fe, мкг/л	-	14	16
Al, мкг/л	-	16	20
Cu, мкг/л	2,7	3,0	2,4
Ni, мкг/л	4,0	4,0	1,7
Zn, мкг/л	-	2,5	0,9
Mn, мкг/л	-	1,5	1,9
Pb, мкг/л	-	0,03	0,00
Cd, мкг/л	-	0,03	0,03
Si, мг/л	0,92	1,18	1,56

Примечание. Прочерк – отсутствие данных.

категорий согласно определителям [Krammer, Lange-Bertalot, 1988–1991; Krammer, 2000, 2002, 2003], номенклатура приведена согласно международной альгологической базе данных [Guiry, Guiry, 2014]. Подсчет и таксономическая идентификация диатомей проводились на световом микроскопе «Motic BA 300» при увеличении в 400–1000 раз, с применением иммерсионного объектива. Дальнейший анализ включал послойное исследование таксономической структуры диатомовых комплексов, динамику относительной численности (%) доминирующих видов и расчет общей численности створок в отложениях. Видовое разнообразие оценивалось с помощью индекса Шеннона–Уивера (H', бит/экз.).

Выполнен анализ толерантности обнаруженных таксонов по отношению к pH и вычислено интегральное значение величины pH для каждого слоя отложений методом авторов [Моисеенко, Разумовский, 2009] по следующей формуле: $pH = Sph_i \times k/Sk$, где ph_i – индивидуальное

значение для каждого таксона-индикатора, k – показатель обилия, которое может быть выражено в баллах или значениями численности. В данной работе в качестве показателя k были использованы величины численности каждого индикаторного таксона [Денисов, 2012].

В анализе использовались сведения об экологии отдельных таксонов водорослей: отношение к pH, солёности, температуре, местообитанию, а также биогеографической приуроченности из обновляемой базы данных по экологии водорослей [Барина и др., 2006].

Для выделения основных этапов развития экосистемы озера за исследованный период накопления донных отложений был применен кластерный анализ; в основу классификации легли показатели относительной численности доминирующих таксонов диатомей.

Результаты диатомового анализа сопоставлялись с показателями современного состояния вод плеса Бабинская Имандра. Отбор проб воды производился в безледный период

2011 года пластиковым батометром Рутнера объемом 2,2 литра с поверхностных и придонных горизонтов. Исследованы температурный режим и гидрохимические характеристики. Анализ выполнен в химико-аналитической лаборатории ИППЭС КНЦ РАН. Все методики определения основных гидрохимических параметров проведены в соответствии с международными стандартами [Standard method..., 1975; Руководство..., 1977]. Для контроля качества измерений pH, щелочности, концентраций хлоридов, сульфатов, щелочных и щелочно-земельных элементов использовалась специализированная компьютерная программа ALPEFORM, включающая в себя сведения о балансе ионов, а также измеренные и расчетные значения электропроводности.

Современное состояние экосистемы водоема оценивалось также с помощью гидробиологических показателей: были получены образцы фитопланктона, проанализировано содержание хлорофиллов [Jeffrey, Humphrey, 1975]. Для анализа также использованы данные, полученные ранее [Каган, 2001; Антропогенные модификации..., 2002; Шаров, 2004].

Результаты и обсуждение

Температурный режим. В районе устья сбросного канала КАЭС температурный режим существенно отличается от естественного и полностью зависит от поступления подогретых вод. На расстоянии 20–50 м от устья сбросного канала подогретые воды начинают растекаться в поверхностном слое (2,0–3,0 м) по более холодным водам озера, в результате чего создается температурное расслоение водной толщи, возникают устойчивые вертикальные градиенты температуры. В зимний и весенний периоды влияние подогретых вод распространяется глубже, чем летом, когда градиенты температуры по глубине максимальные. Во время интенсивного прогрева воды в озере вертикальная стратификация выражена наиболее отчетливо. Температура подогретых вод в сбросном канале АЭС изменяется в течение года на 10–15 градусов: зимой она составляет 10–15 °С, летом поднимается до 26 °С. Роста температуры сбрасываемых подогретых вод за последние десятилетия не произошло.

Гидрохимическая характеристика. Химический состав водной массы в зоне сброса подогретых вод АЭС зависит от природного химического состава воды Бабинской Имандры, химического состава воды в районе водозабора АЭС в Йокостровской Имандре, которая, пройдя технологический цикл, сбрасывается в губу

Молочную и смешивается с ее водными массами, а также от особенностей биохимических процессов, протекающих в озере вследствие его обогрева сбросными теплыми водами. Многолетние исследования гидрохимических параметров плеса Бабинская Имандра [Каган, 2001; Антропогенные модификации..., 2002; Шаров, 2004] показали целый ряд изменений, произошедших в период с 1972 по 2011 год (табл.). Произошло некоторое увеличение pH, содержания сульфатов, аммонийного азота, нитратов, кремния, как результат перекачки вод из Йокостровской Имандры в Бабинскую. В то же время к 2011 году снизились средние концентрации тяжелых металлов – меди, никеля, цинка, что объясняется уменьшением объема сбросов горнопромышленных предприятий. Также отмечено значительное сокращение цветности. Содержание биогенных элементов практически не изменилось с 1990-х годов, что позволяет отнести воды плеса к олиготрофным. В целом водоем может быть охарактеризован как соответствующий естественно-природным гидрохимическим условиям [Романенко и др., 1990]

Фитопланктон. Альгоценозы плеса Бабинская Имандра в губе Молочной соответствуют типичному субарктическому типу с преобладанием диатомовых и золотистых водорослей по численности и биомассе. В пробах встречались десмидиевые водоросли, что также является характерной чертой фитопланктона олиготрофных северных водоемов. Структура сообществ фитопланктона незначительно изменилась с 60-х годов прошлого века [Петровская, 1966]. В исследованных альгоценозах выделяется группа доминантных таксонов, вследствие чего видовое разнообразие в целом сравнительно невелико. Влияние подогретых вод сказывается на таксономической структуре сообществ непосредственно в губе Молочной, особенно – в приустьевом участке сбросного канала, где в течение всего исследованного периода в пробах присутствовали бесшовные диатомовые, а также представители обрастателей и бентоса (в том числе и нитчатые зеленые и харовые водоросли). В составе планктона губы Молочной практически постоянно присутствуют водоросли-термофилы, однако они не встречались в массе [Денисов, Кашулин, 2013]. По сравнению с 1990-ми годами наблюдается некоторое увеличение средних значений содержания хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона (см. табл.). По этим показателям воды Бабинской Имандры в районе станции отбора проб соответствуют мезотрофному трофическому статусу [Китаев, 1984], что является результатом влияния подогретых вод КАЭС

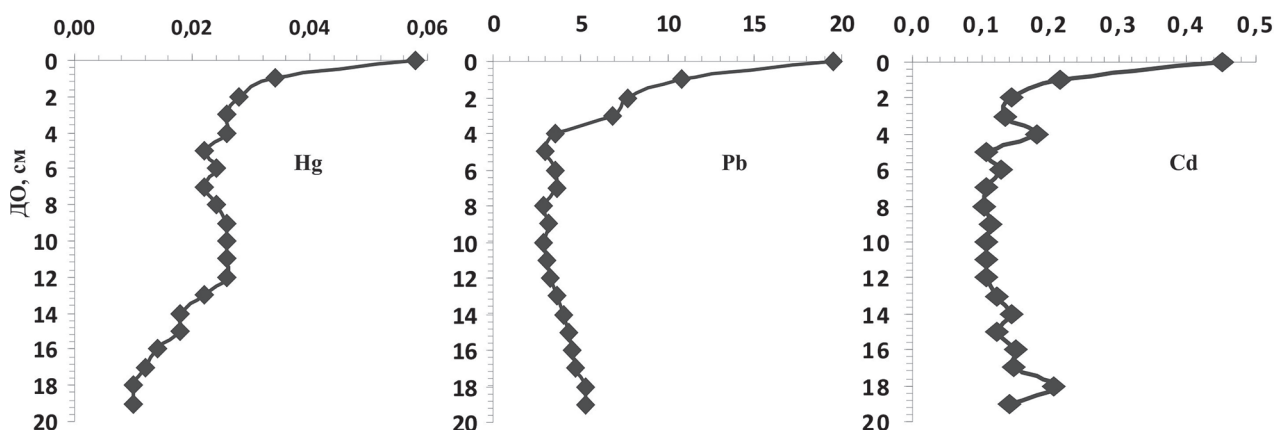


Рис. 2. Динамика содержания некоторых химических элементов (мкг/г) в ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра

и поступления биогенных элементов из Йокостровской Имандры.

Химический состав донных отложений.

Особое внимание было уделено анализу характера распределения в ДО элементов, индицирующих азротехногенное загрязнение, связанное с глобальным развитием промышленности в Западной Европе, – Hg, Pb и Cd (рис. 2). Выявлено значительное увеличение содержания этих металлов в верхних слоях отложений губы Молочной, начиная с глубины 5 см. Очевидно, это результат глобального загрязнения атмосферы северо-запада Европы данными элементами в XIX–XX вв. В поверхностном слое (интервал 0–2 см) произошло наиболее резкое увеличение содержания этих элементов, что является прямым следствием промышленного загрязнения озера Имандра стоками местных промышленных предприятий. Очевидно, максимальные концентрации тяжелых металлов в поверхностных слоях обусловлены также перекачкой вод КАЭС загрязненных вод из Йокостровской Имандры в Бабинскую. Таким образом, интенсивное промышленное загрязнение озера началось в период формирования интервала ДО 4–5 см (~1930 г.), а интервал 0–2 см соответствует периоду работы КАЭС (~1973–2011 гг.). Более древние слои отложений, очевидно, относятся к так называемому «доиндустриальному» периоду развития экосистемы водоема.

Диатомовые комплексы донных отложений. Всего был обнаружен 91 таксон диатомовых водорослей рангом ниже рода; наиболее массовые виды, составляющие основу численности, представлены на рисунке 3. Комплекс доминантных видов составили: *Aulacoseira alpigena* (Grun.) Kramm., *Ellerbeckia arenaria* (Ralfs ex Moore) Crawf., *Cyclotella schumannii* (Grun.) Håkans., *C. radiosa* (Grun.) Lemm.,

C. ocellata Pant., *C. bodanica* Eulenstein ex Grun., *C. rossii* Håkans., *C. comensis* Grun. in VanHeurck 1882, *Denticula tenuis* Kütz., виды рода *Tabellaria*.

Выявлены существенные перестройки в составе и структуре диатомовых комплексов по направлению от нижних слоев к верхним. В наиболее древних интервалах колонки (ДО 18–16 см) массовыми видами были планктонные центрические формы – *Aulacoseira alpigena* и *Cyclotella radiosa*, а также бентосный вид *Ellerbeckia arenaria*, присутствие которого в древних слоях ДО оз. Имандра отмечено в предыдущих исследованиях [Каган, 2001]. Выше по профилю колонки (ДО 16–14 см) относительная численность этих видов снижается, позиции доминантов занимают *Cyclotella schumannii*, *C. bodanica* и виды рода *Tabellaria*.

Далее (ДО 16–11 см) в отложениях появляются новые для озера массовые планктонные виды – *Cyclotella bodanica* и *C. rossii*, возрастает численность *C. schumannii* и видов рода *Tabellaria*. В более молодых слоях, начиная с 11 см, происходит практически полное исчезновение из состава диатомовых комплексов *Ellerbeckia arenaria*, *Cyclotella radiosa*, *C. rossii*, сокращается относительная численность *C. bodanica*. Выявлено резкое снижение (до полного исчезновения) видов рода *Tabellaria* в слое 9–10 см. При этом появляется новый для отложений вид – *Cyclotella commensis*, который становится доминирующим (до 40 %) в слое 10–11 см.

Изменения диатомовых комплексов происходят также в верхних слоях донных отложений, в интервале 0–5 см: вновь возрастает доля видов рода *Tabellaria*, сокращается численность *C. comensis* и *C. ocellata*.

Значительные изменения на всей исследованной толще ДО происходили также с общим обилием диатомей (N), выраженным числом

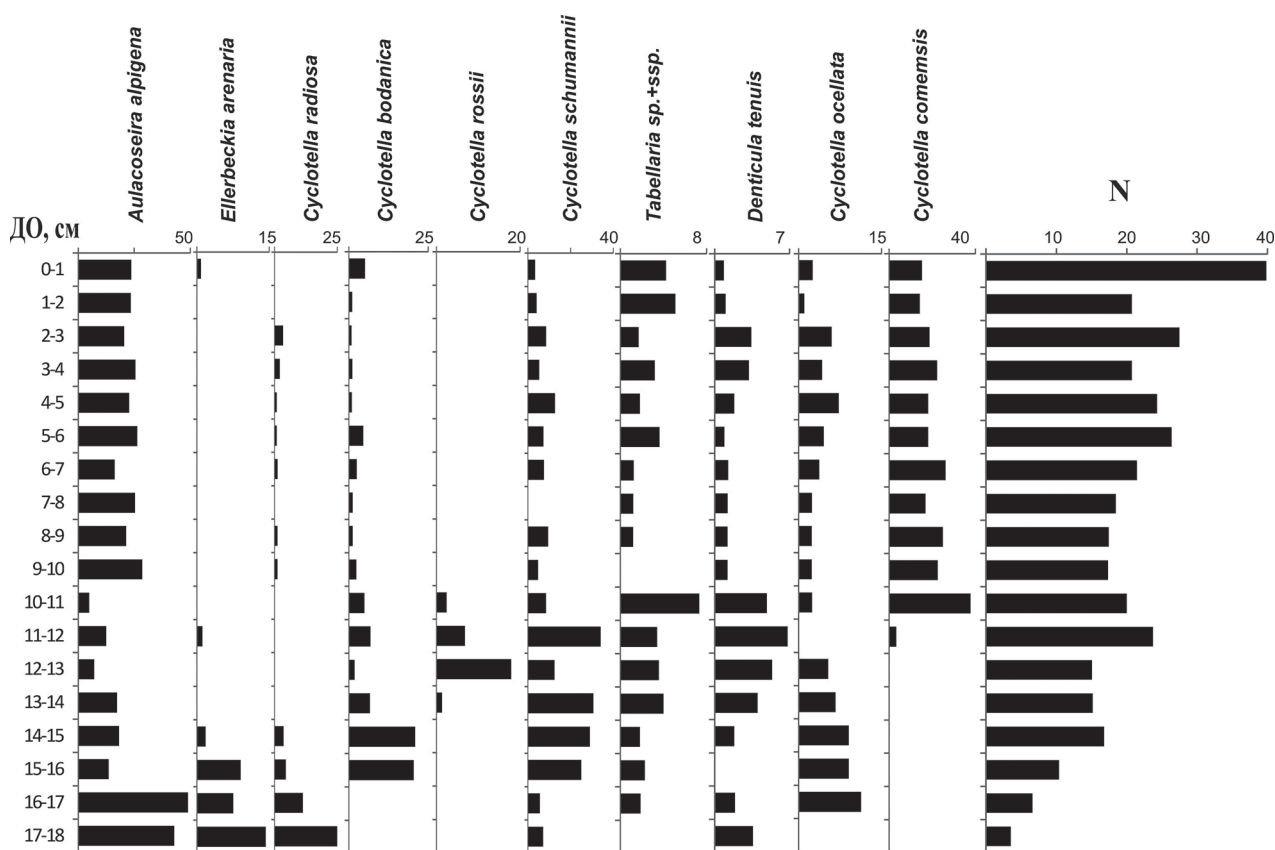


Рис. 3. Диатомовые комплексы ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра: относительная численность (%) наиболее массовых видов, N – численность створок диатомей, млн экз./г сух. в-ва

экземпляров в граммах сухого вещества отложений (рис. 3). В самых древних слоях (16–18 см) численность диатомей была низкой, затем происходило постепенное ее увеличение. Наиболее резко (почти в два раза) обилие диатомей возросло в самом молодом, поверхностном слое ДО – с 20 до 40 млн экз./г сух. в-ва. В предыдущих исследованиях была получена обратная картина [Каган, 2001], что, очевидно, связано с отличиями в условиях осадко-накопления в зоне влияния сбросного канала.

Анализ экологических групп диатомей по отношению к различным факторам показал, что за весь период накопления исследованной толщи ДО в озере доминировали планктонные формы диатомей (рис. 4, а). Наибольшая их доля была характерна для самых древних из изученных слоев, в дальнейшем наблюдалось увеличение и планктонно-бентосных форм. В интервале ДО 12–13 см донные формы и обрастатели развивались наиболее активно, было отмечено увеличение доли бентосного вида *Brachysira vitrea* (Grun.) Ross и планктонно-бентосного *Cyclotella meneghiniana* Kütz. В современных слоях существенных изменений в соотношении групп диатомей по отношению к местообитанию отмечено не было.

Диатомовые комплексы исследованной толщи отложений представлены типичными пресноводными видами (рис. 4, б). Во всех слоях присутствуют галофобы, характерные для ультрапресных вод. Начиная со слоя 10–11 см и далее вверх по колонке резко увеличивается доля мезогалобов, предпочитающих развиваться в водах с повышенной минерализацией (*Cyclotella comensis*), что указывает на изменение минерализации вод в этот период. Судя по распределению содержания тяжелых металлов в ДО (см. рис. 2), это произошло по естественным причинам, вероятно, связанным с усилением эрозионных процессов на водосборе, вызванным потеплением климата.

По отношению к pH в ДО всех слоев преобладают индифференты (рис. 4, в). Доля ацидофилов сравнительно невелика. По направлению от древних слоев к современным наблюдается постепенное уменьшение доли алкалобионтов, развивающихся при pH > 7,5. В целом воды озера на всем исследованном периоде соответствуют слабощелочной активной реакции.

По биогеографической приуроченности диатомовые комплексы исследованных ДО характеризуются присутствием аркто-альпийских

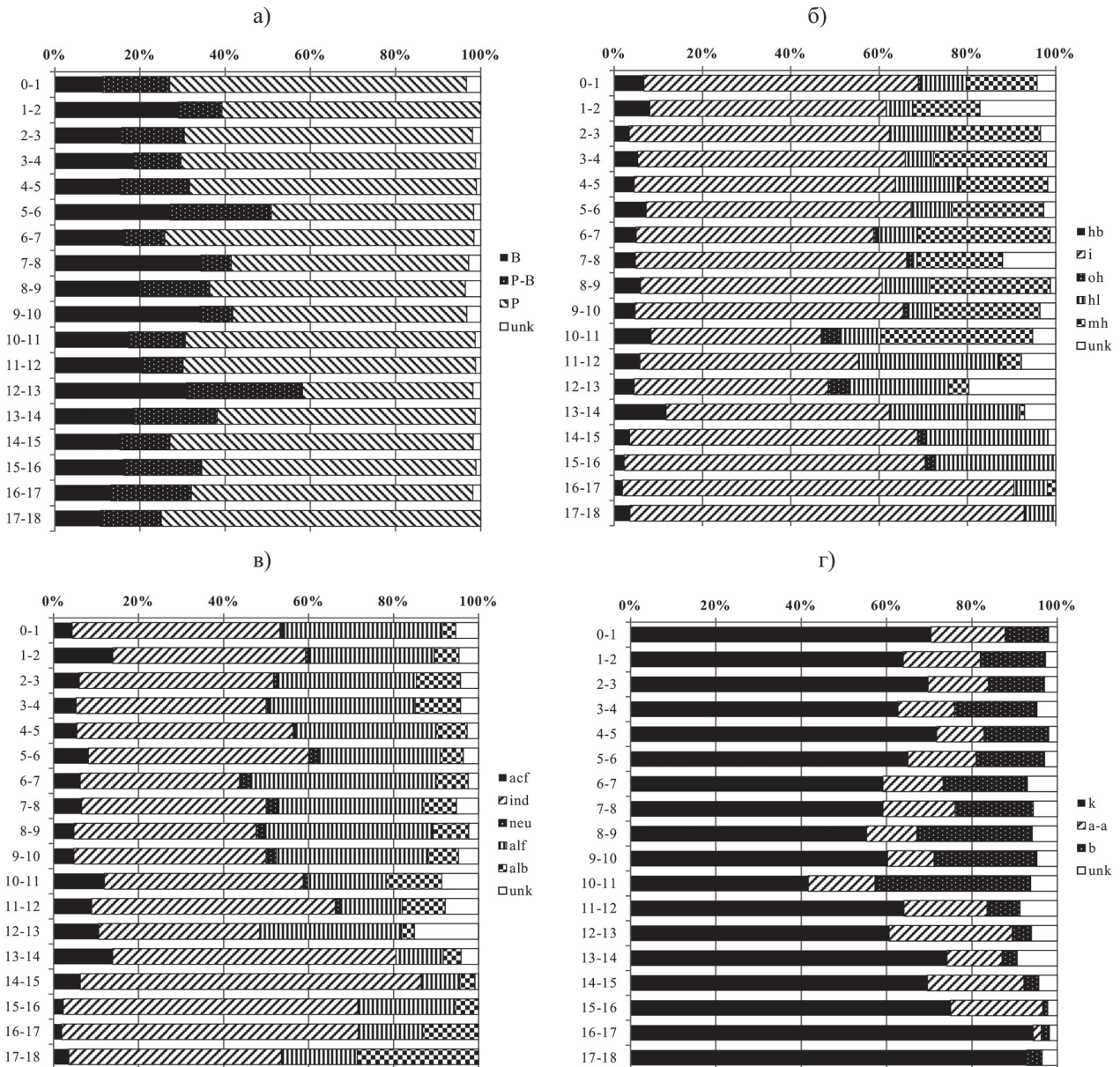


Рис. 4. Соотношение экологических групп диатомей в ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра: а) по отношению к местообитанию (P – планктонные, P-B – планктонно-бентосные, B – бентосные); б) по отношению к солености (hb – галофобы, i – индифференты, oh – олигогалофы, hl – галофилы, mh – мезогалофы); в) по отношению к pH (acf – ацидофилы, ind – индифференты, neu – нейтрофилы, alf – алкаифилы, alb – алкалибионты), г) по биогеографической приуроченности (k – космополиты, a-a – аркто-альпийские, b – бореальные). unk – отсутствие данных

видов, что является типичной чертой водоемов субарктики. Не обнаружены аркто-альпийские виды только в самых древних слоях колонки (17–18 см). Начиная с интервала ДО 10–11 см увеличивается доля бореальных видов, что свидетельствует о потеплении климата (рис. 4, г).

Для оценки исторических изменений в температурном режиме водоема была проанализирована динамика доли термофилов в составе диатомовых комплексов (рис. 5). Изменение количества тепловодных диатомей носит сложный характер. Наименьшей их доля была

в самых древних слоях (3,6 %), наибольшей – в современных (15,3 %). Отмечено снижение доли термофилов в интервале 2–5 см, когда началось антропогенное загрязнение оз. Имандра. В современных слоях резкого увеличения доли термофилов в ответ на тепловое загрязнение КАЭС выявлено не было.

Реконструированные по диатомовым комплексам значения pH изменяются в диапазоне 7,00–7,36 и демонстрируют некоторый тренд к снижению по направлению к поверхностным слоям отложений (см. рис. 5). За весь

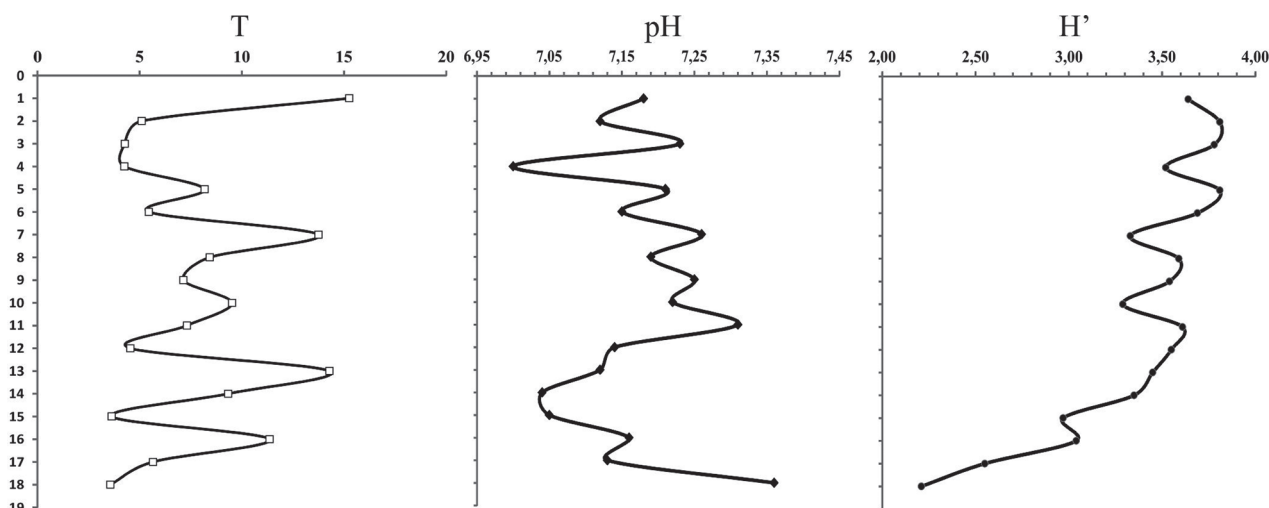


Рис. 5. Динамика некоторых показателей диатомовых комплексов в ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра: Т – доля термофилов, %; рН – значения активной реакции воды, реконструированные по диатомовым комплексам; Н' – индекс видового разнообразия Шеннона–Уивера, бит/экз.

исследованный период наблюдалось два минимума рН: в интервалах 12–17 и 3–5 см. Первый связан с естественной динамикой гидрохимических параметров как результат возможного заболачивания берегов озера. Это подтверждается увеличением доли ацидофильных донных форм и обрастателей в тот период (см. рис. 4, а). Второй минимум рН приходится на период интенсивного развития промышленности на водосборе озера, что привело к выпадению кислотообразующих соединений с осадками. Тенденция снижения рН в исследованном участке озера подтверждается результатами предыдущих исследований [Каган, 2001]. Значение рН поверхностных слоев отложений хорошо согласуется с данными гидрохимического анализа вод (табл.).

По направлению от древних слоев к современным увеличивается видовое разнообразие диатомей (рис. 5). В нижней части колонки наблюдается резкое увеличение Н' в интервале 11–18 см, затем положительный тренд становится менее выраженным. Наиболее разнообразны диатомовые комплексы в поверхностных ДО (0–3 см). Вероятно, увеличение видового разнообразия в древних слоях обусловили климатические изменения в сторону потепления, когда возникли благоприятные условия для развития донных форм, доля которых в этот период увеличивалась (см. рис. 4, а). С началом промышленного загрязнения изменились гидрохимические условия, что предоставило возможность развиваться новым видам диатомей. На современном этапе вклад в видовое разнообразие стали вносить реофильные формы, развивающиеся благодаря наличию течения из устья сбросного канала КАЭС. Увеличение

видового разнообразия было отмечено и в предыдущих исследованиях [Каган, 2001].

Этапы наиболее значимых изменений в экосистеме водоема подтверждают результаты кластерного анализа, выполненного на основе соотношения относительной численности диатомей (рис. 6). Было выделено четыре этапа развития озера. Первые два (I и II), в свою очередь объединенные в один кластерный блок, характеризуют «доиндустриальный» период развития водоема. Третий этап (III) включает слои, сформированные при участии антропогенного фактора – промышленного загрязнения. Четвертый (VI) – характеризует современные условия, когда начала работу КАЭС. Также выделяются слои ДО, соответствующие переходным этапам в исторической динамике экосистемы озера (см. рис. 6).

I этап охватывает период, когда происходило формирование самых древних из исследованных слоев ДО (16–18 см). Он отличается наименьшим сходством с остальными. Условия для развития диатомовых водорослей в этот период были наименее благоприятными, разнообразие и общее обилие диатомей – самым низким. В озере развивались преимущественно центрические планктонные формы. По-видимому, этот период соответствует последнему этапу Малого ледникового периода (XIV–XIX вв.), когда низкая температура воды и короткое лето препятствовали развитию водорослей.

II этап соответствует времени, когда началось окончание Малого ледникового периода и потепление привело к увеличению общего обилия и видового разнообразия водорослей (11–16 см). Возросла доля бентосных форм

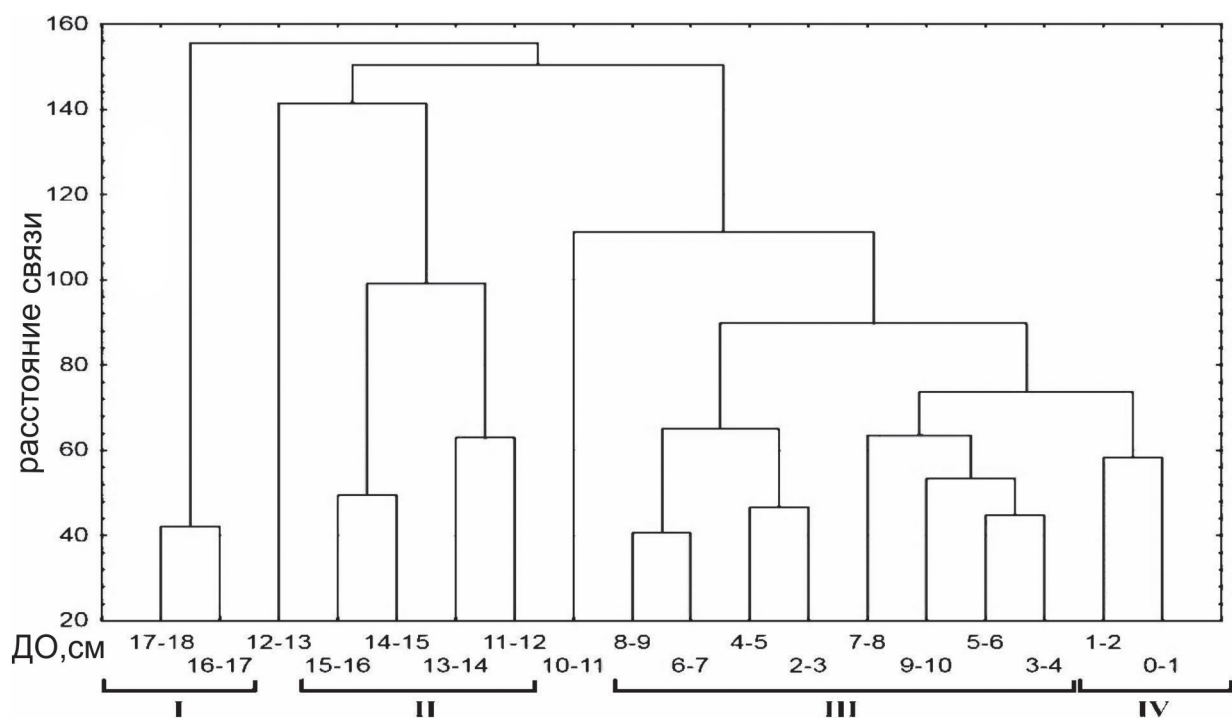


Рис. 6. Классификация слоев ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра на основе соотношения относительной численности диатомей и основные этапы развития экосистемы водоема по результатам кластерного анализа (методом Варда, манхэттенские расстояния)

и обрастателей, более обильными стали планктонно-бентосные диатомей, увеличилось количество теплолюбивых видов. Очевидно, в зоне литорали стали развиваться водорослевые обрастания, не исключено, что часть береговой зоны оказалась заболочена, о чем свидетельствует снижение pH в этот период (см. рис. 5).

III этап отделяется от предыдущих слоев ДО 10–13, характеризующим переходный период, когда произошла смена доминантных таксонов диатомей в ответ на изменения окружающей среды и климата. Очевидно, в озере изменился не только температурный режим в связи с дальнейшим потеплением, но и гидрохимические условия. В составе диатомовых ценозов возрастает доля солоноватоводных форм, что свидетельствует об интенсификации эрозионных процессов на водосборе с последующим увеличением минерализации вод (см. рис. 4, б). Резко увеличивается численность бореальных диатомей и величина pH, что также свидетельствует о потеплении (см. рис. 4, г; рис. 5). В это время в озере сформировались новые гидролого-гидрохимические условия, способствующие дальнейшему росту общей численности и видового разнообразия диатомей. Окончание этого этапа связано с началом промышленного загрязнения водоема. Это проявилось в снижении pH из-за выпадения кислотообразующих соединений. Изменение гидрохимических параметров в это время не

привело к перестройке структуры доминирования диатомовых комплексов (см. рис. 2).

IV этап объединяет слои, сформировавшиеся на современном этапе развития экосистемы озера (0–2 см). Он характеризуется резким увеличением общего обилия диатомей: в поверхностном слое ДО численность их стала выше в два раза по сравнению с предыдущим слоем. Вновь увеличилась доля термофилов в составе сообществ, достигнув максимального для исследованной колонки значения. Вероятной причиной этого стала работа КАЭС, в результате чего изменился не только температурный режим, но и гидрологические и гидрохимические условия развития гидробионтов. Поступление подогретых вод наряду с перекачкой биогенных элементов из плеса Йокостровская Имандра и организацией форелевого хозяйства в устье сбросного канала привело к росту трофического статуса и резкому увеличению количественных показателей диатомовых водорослей.

Выводы

Колонки ДО, полученные на выбранной глубоководной станции – на выходе из губы Молочной плеса Бабинская Имандра, позволили исследовать продолжительный этап исторического развития водоема, включая так называемый «доиндустриальный» период. Очевидно,

скорость осадконакопления на этом участке невысока и седиментогенез в меньшей степени зависит от течения сбросного канала, так как взвешенные вещества оседают ближе к устью. В то же время диатомовые комплексы, сформированные здесь, отражают все происходящие в экосистеме процессы, включая динамику температурного режима.

В настоящее время по своим гидрохимическим характеристикам плес Бабинская Имандра соответствует естественно-природным, «фоновым» водоемам Кольского полуострова, несмотря на изменения в некоторых показателях в последние десятилетия. Так, результатом перекачки вод из более загрязненного плеса Йокостровская Имандра в Бабинскую стало некоторое увеличение рН, содержания сульфатов, аммонийного азота, нитратов и кремния. Сокращение объемов производства промышленных предприятий привело к уменьшению концентраций тяжелых металлов, значительно снизилась цветность воды. Эти процессы во многом определяются температурным режимом, который напрямую зависит от поступления подогретых вод КАЭС и регулирует как химические, так и биологические процессы.

Современные альгоценозы планктона плеса Бабинская Имандра по своему таксономическому составу соответствуют типичному субарктическому типу. По уровню биомассы и содержанию хлорофилла *a* трофический статус вод определяется как мезотрофный; отмечено некоторое увеличение этих показателей по сравнению с 1990-ми годами, что также определяется работой КАЭС. В составе сообществ фитопланктона, развивающегося ближе к устью сбросного канала, присутствуют теплолюбивые водоросли.

Характер распределения в ДО тяжелых металлов подтверждает невысокие темпы седиментации на исследованном участке. Выявлено значительное увеличение содержания Hg, Pb и Cd в верхних слоях отложений, начиная с глубины 5 см. Таким образом, был определен период, охватывающий интенсивное промышленное загрязнение оз. Имандра, приблизительно соответствующий 1930–1970 годам. Максимальные концентрации тяжелых металлов в современных слоях ДО обусловлены перекачкой КАЭС загрязненных вод из Йокостровской Имандры в Бабинскую и соответствуют периоду с 1973 по 2011 год. Более древние слои отложений были сформированы в «доиндустриальный» период развития экосистемы водоема.

По направлению от нижних слоев ДО к верхним выявлены существенные перестройки в составе и структуре диатомовых комплексов

и их количественных характеристиках. На протяжении исследованного периода происходила смена доминирующих групп диатомей, появление и исчезновение отдельных видов. Выявлен выраженный тренд к увеличению общего обилия диатомовых водорослей, при этом наиболее резко (почти в два раза) их численность возросла в современном слое ДО, как результат непосредственного влияния подогретых вод КАЭС наряду с поступлением биогенных элементов из плеса Йокостровская Имандра.

Весь исследованный период формирования ДО в составе диатомовых водорослей господствовали планктонные формы центрических диатомей. Наиболее массовыми были типичные пресноводные виды, и только с середины колонки резко увеличивается доля солоноватоводных диатомей. Усиление минерализации вод, вероятно, определялось природными процессами, связанными с потеплением климата и интенсификацией эрозионных процессов на водосборе; впоследствии свой вклад внесло и промышленное загрязнение. В диатомовых комплексах присутствуют аркто-альпийские виды, что является типичной чертой водоемов субарктики. Отмечено увеличение доли бореальных видов в середине разреза, что подтверждает потепление климата.

Историческая динамика количества тепловодных диатомовых водорослей носит сложный характер. Максимальная их доля была отмечена в современном, поверхностном слое ДО. Следует отметить, что озеро сохраняло черты холодноводного весь исследованный период, и присутствие термофилов, вероятно, не определяется только лишь температурным фактором, а зависит от всего комплекса условий среды.

Историческая динамика интегральных значений рН характеризуется некоторым трендом к снижению по направлению к поверхностным слоям отложений. В целом активная реакция воды соответствует слабощелочной, что хорошо согласуется с современными гидрохимическими данными и подтверждается результатами предыдущих исследований [Каган, 2001].

По направлению от древних слоев к современным увеличивается видовое разнообразие диатомей. Резкое увеличение H' в наиболее старых из исследованных слоев иллюстрирует заселение озера новыми видами диатомей в ходе окончания Малого ледникового периода. Наиболее разнообразны диатомовые комплексы в поверхностных ДО, когда число видов пополнилось реофильными диатомеями, развивающимися в сбросном канале КАЭС и его приустьевом участке.

По результатам кластерного анализа было выделено четыре этапа в развитии экосистемы водоема. Первый этап охватывает наименее благоприятный для развития диатомей период, соответствующий последнему этапу Малого ледникового периода. На втором этапе на фоне потепления климата произошло увеличение общего обилия и видового разнообразия диатомей, сформировались литоральные и бентосные сообщества водорослей, увеличился сток с водосбора, что, вероятно, способствовало поступлению подкисленных болотных вод. Начало третьего этапа связано с изменением температурного режима водоема в ответ на дальнейшее потепление климата наряду с трансформацией гидрохимических параметров. На этом этапе возросла минерализация вод, как результат интенсификации эрозионных процессов на водосборе. Окончание этого этапа было ознаменовано началом промышленного загрязнения водоема, когда выпадение кислотообразующих соединений привело к снижению pH. Четвертый, современный этап характеризуется резким увеличением общего обилия диатомей, причиной чего стал ввод в эксплуатацию КАЭС. Интенсификация продукционных процессов водорослевых сообществ плеса Бабинская Имандра определяется не только новым температурным режимом, но и изменением гидрологических и гидрохимических условий: изменением естественной картины течений при строительстве дамбы и поступлением биогенных элементов и загрязнителей из плеса Йокостровская Имандра.

Литература

- Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра.* М.: Наука, 2002. 339 с.
- Барина С. С., Медведева Л. А.* Атлас водорослей-индикаторов сапробности (российский Дальний Восток). Владивосток: Дальнаука, 1996. 364 с.
- Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.
- Давыдова Н. Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Даувальтер В. А.* Факторы формирования химического состава донных отложений: Учебное пособие по дисциплине «Геохимия окружающей среды» для направления 511100 «Экология и природопользование». Мурманск: МГТУ, 2002. 76 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.* Долговременные изменения химического состава донных отложений озера Имандра в зоне влияния стоков Кольской атомной электростанции // Труды Кольского НЦ РАН «Прикладная экология Севера». 2013. 3 (16). С. 6–35.
- Денисов Д. Б., Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Каган Л. Я.* Долговременные изменения состояния субарктических водоемов в условиях антропогенной нагрузки (по данным диатомового анализа) // Биология внутренних вод. 2006. № 1. С. 24–30.
- Денисов Д. Б.* Изменения гидрохимического состава и диатомовой флоры донных отложений в зоне воздействия горнорудного производства (Кольский полуостров). Водные ресурсы, 2007. Т. 34, № 6. С. 719–730.
- Денисов Д. Б.* Экологические особенности водорослевых сообществ разнотипных субарктических водоемов // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 1. С. 48–55.
- Денисов Д. Б.* Реконструкция развития экосистемы малого горного субарктического водоема за последние 900 лет (на примере озера Академическое, Хибин, Кольский полуостров) // Труды Кольского НЦ РАН «Прикладная экология Севера». 2012. 2 (9). С. 126–148.
- Денисов Д. Б., Кашулин Н. А.* Современное состояние водорослевых сообществ планктона в зоне влияния Кольской АЭС (оз. Имандра) // Труды Кольского НЦ РАН «Прикладная экология Севера». 2013. 3 (16). С. 35–68.
- Диатомовый анализ.* Л.: ГИГЛ, 1949. Кн. 1. 240 с.; кн. 2. 238 с.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области.* Мурманск: Мурман. кн. изд-во, 2009. 152 с.
- Каган Л. Я.* Изменение сообществ диатомовых водорослей при антропогенном преобразовании экосистемы оз. Имандра // Вод. ресурсы. 2001. № 3. С. 329–338.
- Косова А. Л., Малышева М. Б., Денисов Д. Б.* К методике камеральной обработки проб для диатомового анализа донных отложений // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12–17 сентября 2011 г.). В 2 т. / Рос. акад. наук, Отд. наук о Земле, Комиссия по изуч. четвертич. периода, Геологический ин-т КНЦ РАН. Апатиты; СПб., 2011. Т. 1 (А–К). С. 294–295.
- Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Сандимиров С. С. и др.* Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2008. Т. 1. 250 с.
- Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б. и др.* Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 98–107.
- Китаев С. П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
- Моисеенко Т. И., Разумовский Л. В.* Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озерах (диатомовый анализ) // Доклады Академии наук, 2009, Т. 427, № 1, С. 132–135.
- Петровская М. В.* Характеристика зоопланктона озер Мурманской области // Рыбы Мурманской области. Мурманск, 1966. С. 84–90.

Разумовский Л. В., Гололобова М. А. Реконструкция температурного режима и сопряженных гидрологических параметров по диатомовым комплексам из оз. Глубокого // Водные ресурсы, 2008. Т. 35, № 4. С. 490–504.

Родюшкин И. В. Формы металлов в воде оз. Имандра // Проблемы химического и биологического экологического состояния водных объектов Кольского Севера. Апатиты: Кольск. науч. центр РАН, 1995. С. 44–59.

Романенко В. Д., Оксюк О. П., Жукинский В. Н. и др. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев: Наук. думка, 1990. 256 с.

Руководство по методам химического анализа морских вод. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 208 с.

Шаров А. Н. Фитопланктон водоемов Кольского полуострова. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2004. 113 с.

Gaiser E., Rühland K. 2010. Diatoms as indicators in wetlands and peatlands. In: Smol, J. P. and Stoermer, E. F. (editors). The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences. 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, P. 473–496.

Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2014. <http://www.algaebase.org>; searched on 21 April 2014.

Jeffrey W., Humphrey G. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c and O₂

in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochem. Physiol. 1975. Vol. 167. P. 191–194

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae, Subwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart/Jena: Gustav Fischer Verlag, 1988–1991. Vol. 2 (1–4).

Krammer K. The genus Pinnularia // H. Lange-Bertalot (ed.), Diatoms of Europe. 1: A. R. G. Gantner Verlag K. G., Vaduz, 2000. 703 p.

Krammer K. Cymboplectra, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocybella // H. Lange-Bertalot (ed.), Diatoms of Europe, 4: A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell, 2003. 530 p.

Krammer K. Cymbella // H. Lange-Bertalot (ed.), Diatoms of Europe. 3: A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell, 2002. 584 p.

Moiseenko T. I., Dauvalter V. A., Iljashyk B. P. et al. A Paleocological Reconstruction of Anthropogenic Load // Doklady Akademii Nauk, 2000. Vol. 370, No 1. P. 115–118.

Paul C. A., Douglas M. S. V., Smol J. P. 2010. Diatom-inferred Holocene climatic and environmental changes in an unusually subsaline high Arctic nunatak pond on Ellesmere Island (Nunavut, Canada) // Journal of Paleolimnology. Vol. 44. P. 913–929.

Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As-NLN, 1979. No 2. 7 s.

Standard method for examination for water and wastewater. USA. 1975. 1195 p.

Поступила в редакцию 22.12.2014

References

Antropogennye modifikatsii ekosistemy ozera Imandra [Anthropogenic modification of Lake Imandra ecosystem]. Moscow: Nauka, 2002. 339 p.

Barinova S. S., Medvedeva L. A. Atlas vodoroslei-indikatorov saprobnosti (rossiiskii Dal'nii Vostok) [Atlas of algal indicators of saprobity (Russian Far East)]. Vladivostok: Dal'nauka, 1996. 364 p.

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy [Biodiversity of algal-environmental indicators]. Tel' Aviv: PiliesStudio, 2006. 498 p.

Davydova N. N. Diatomovye vodorosli – indikatorы prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene [Diatoms – indicators of environmental conditions of water bodies in the Holocene]. Leningrad: Nauka, 1985. 244 p.

Dauval'ter V. A. Faktory formirovaniya khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii [Factors of chemical composition formation of bottom sediments]: Uchebnoe posobie po distsipline «Geokhimiya okruzhayushchei sredy» dlya napravleniya 511100 «Ekologiya i prirodopol'zovanie» [Manual on «Geochemistry of the environment», major 511100 «Ecology and environmental management»]. Murmansk: MGTU, 2002. 76 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Dolgovremennye izmeneniya khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii ozera Imandra v zone vliyaniya stokov Kol'skoi atomnoi elektrostantsii [Long-term changes in the chemical composition of Imandra Lake sediments within the

zone of waste water influence of the Kola nuclear power plant]. Trudy Kol'skogo NTs RAN «Prikladnaya ekologiya Severa» [Proc. Kola SC RAS «Applied ecology of the North»]. 2013. 3 (16). P. 6–35.

Denisov D. B., Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Kagan L. Ya. Dolgovremennye izmeneniya sostoyaniya subarkticheskikh vodoemov v usloviyakh antropogennoi nagruzki (po dannym diatomovogo analiza) [Long-term changes in the state of Subarctic water bodies under anthropogenic load (according to diatom analysis)]. Biologiya vnutrennikh vod [Inland water biology]. 2006, No 1. P. 24–30.

Denisov D. B. Izmeneniya gidrokhimicheskogo sostava i diatomovoi flory donnykh otlozhenii v zone vozdeistviya gornorudnogo proizvodstva (Kol'skii poluostrov) [Changes in the hydrochemical composition and diatomic flora of bottom sediments in the zone of influence of metal mining production (Kola Peninsula)]. Vodnye resursy [Water resources]. 2007. Vol. 34, No 6, P. 719–730.

Denisov D. B. Ekologicheskie osobennosti vodoroslykh soobshchestv raznotipnykh subarkticheskikh vodoemov [Algae communities' ecological peculiarities in polytypic subarctic water objects]. Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN [Herald of Kola SC RAS]. 2010. No 1. P. 48–55.

Denisov D. B. Rekonstruktsiya razvitiya ekosistemy malogo gornogo subarkticheskogo vodoema za

poslednie 900 let (na primere ozera Akademicheskoe, Khibiny, Kol'skii poluostrov) [Reconstruction of the ecosystem development in the small subarctic mountain water body during the last 900 years (case study of Lake Akademicheskoe, Khibiny, Mountains, Kola Peninsula)]. *Trudy Kol'skogo NTs RAN «Prikladnaya ekologiya Severa»* [Proc. Kola SC RAS «Applied ecology of the North»]. 2/2012(9). P. 126–148.

Denisov D. B., Kashulin N. A. Sovremennoe sos- toyanie vodoroslevykh soobshchestv planktona v zone vliyaniya Kol'skoi AES (oz. Imandra) [The phytoplankton communities under the Kola nuclear power plant (Lake Imandra)]. *Trudy Kol'skogo NTs RAN «Prikladnaya ekologiya Severa»* [Proc. Kola SC RAS «Applied ecology of the North»]. 2013. 3 (16). P. 35–68.

Diatomovyi analiz [Diatom analysis]. Leningrad: GIGL, 1949, book 1. 240 p.; book 2. 238 p.

Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Murmanskoi oblasti [Report on environmental status and protection in the Murmansk Region]. Murmansk: Kn. izd-vo, 2009. 152 p.

Kagan L. Ya. Izmenenie soobshchestv diatomovykh vodoroslei pri antropogennom preobrazovanii ekosistemy oz. Imandra [Human-induced changes in the diatom communities of Lake Imandra]. *Vod. resursy* [Water resour.]. 2001. No 3. P. 329–338.

Kosova A. L., Malysheva M. B., Denisov D. B. K metodike kameral'noi obrabotki prob dlya diatomovogo analiza donnykh otlozhenii [On the methods of cameral treatment of samples for the diatom analysis of bottom sediments]. *Kvarter vo vsem ego mnogoobrazii. Fundamental'nye problemy, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neishikh issledovaniy: Materialy VII Vserossiiskogo soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda (g. Apatity, 12–17 sentyabrya, 2011 g.)* [The Quaternary in all of its variety. Basic issues, results and major trends of further research. Proc. of the 7th All-Russian Quaternary conference (Apatity, 12–17 September, 2011)]. In 2 vol. RAS, Dep. of Earth Sciences, Commission on Quaternary period research, Geological Institute of KSC RAS. Apatity; St. Petersburg, 2011. Vol. 1. (A–K). P. 294–295.

Kashulin N. A., Denisov D. B., Sandimirov S. S., Dauval'ter V. A., Kashulina T. G., Malinovskii D. N., Vandysh O. I., Il'yashuk B. P., Kudryavtseva L. P. Antropogennye izmeneniya vodnykh sistem Khibinskogo gornogo massiva (Murmanskaya oblast') [Human induced changes in aquatic systems of the Khibiny Mountains (Murmansk Region)]. Apatity: Kol'skii nauchnyi tsentr RAN, 2008. Vol. 1. 250 p.

Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Denisov D. B., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Kashulin A. N. Nekotorye aspekty sovremennogo sostoyaniya presnovodnykh resursov Murmanskoi oblasti [Some aspects of current state of freshwater resources in the Murmansk Region]. *Vestnik MGTU [Herald MSTU]*. 2013. Vol. 16, No 1. P. 98–107.

Kitaev S. P. Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznykh prirodnykh zon [Ecological bases of bioproductivity of lakes in different natural zones]. Moscow: Nauka, 1984. 207 p.

Moiseenko T. I., Razumovskii L. V. Novaya metodika rekonstruktsii kationno-anionnogo balansa v ozerakh

(diatomovyi analiz) [A new technique for reconstructing the cation-anion balance in lakes by diatom analysis]. *Doklady Akademii Nauk [Proc. USSR Acad. Sci.]*. 2009. Vol. 427, No 1, P. 132–135.

Petrovskaya M. V. Kharakteristika zooplanktona ozer Murmanskoi oblasti [Characteristic of zooplankton in lakes of the Murmansk Region]. *Ryby Murmanskoi oblasti*. Murmansk, 1966. P. 84–90.

Razumovskii L. V., Gololobova M. A. Rekonstruktsiya temperaturnogo rezhima i sopryazhennykh gidrologicheskikh parametrov po diatomovym kompleksam iz oz. Glubokogo [Reconstruction of the temperature regime and the hydrologic parameters associated with it by using data on diatomic complexes from Lake Glubokoe]. *Vodnye resursy* [Water resour.]. 2008. Vol. 35, No 4. P. 490–504.

Rodyushkin I. V. Formy metallov v vode oz. Imandra [Metal compounds in water of Lake Imandra]. *Problemy khimicheskogo i biologicheskogo ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ob'ektov Kol'skogo Severa [Problems of chemical, biological and ecological state of water bodies of the Kola North]*. Apatity: Kol'sk. nauch. tsentr RAN, 1995. P. 44–59.

Romanenko V. D., Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Stol'berg F. V., Lavrik V. I. Ekologicheskaya otsenka vozdeistviya gidrotekhnicheskogo stroitel'stva na vodnye ob'ekty [Environmental assessment of hydraulic engineering impact on water bodies]. Kiev: Nauk. Dumka, 1990. 256 p.

Rukovodstvo po metodam khimicheskogo analiza morskikh vod [Manual on methods of chemical analysis of marine waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 208 p.

Sharov A. N. Fitoplankton vodoemov Kol'skogo poluostrova [Phytoplankton in the water bodies of the Kola Peninsula]. Petrozavodsk: KarRS of RAS, 2004. 113 p.

Gaiser E., Rühland K. Diatoms as indicators in wetlands and peatlands. In: Smol J. P. and Stoermer E. F. (editors). *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2010. P. 473–496.

Guiry M. D., Guiry G. M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2014. <http://www.algaebase.org>; searched on 21 April 2014.

Jeffrey W., Humphrey G. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c* and O_2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol.* 1975. Vol. 167. P. 191–194

Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae, Subwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart/Jena: Gustav Fisher Verlag, 1988–1991. Vol. 2 (1–4).

Krammer K. The genus *Pinnularia*. In: H. Lange-Bertalot (ed.), *Diatoms of Europe*. 1: A. R. G. Gantner Verlag K. G., Vaduz, 2000. 703 p.

Krammer K. *Cymbopleura*, *Delicata*, *Navicymbula*, *Gomphocymbellopsis*, *Afrocybella*. In: H. Lange-Bertalot (ed.), *Diatoms of Europe*, 4: A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell, 2003. 530 p.

Krammer K. *Cymbella*. In: H. Lange-Bertalot (ed.), *Diatoms of Europe*. 3: A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell, 2002. 584 p.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Il'yashuk B. P., Kagan L. J., Il'yashuk E. A. A Paleocological Reconstruction

of Anthropogenic Load. *Doklady Akademii Nauk*, 2000. Vol. 370, No 1. P. 115–118.

Paul C. A., Douglas M. S. V., Smol J. P. 2010. Diatom-inferred Holocene climatic and environmental changes in an unusually subsaline high Arctic nunatak pond on Ellesmere Island (Nunavut, Canada). *Journal of Paleolimnology*. Vol. 44. P. 913–929.

Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As-NLN, 1979. No 2. 7 s.

Standard method for examination for water and wastewater. USA. 1975. 1195 p.

Received December 22, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Денисов Дмитрий Борисович

старший научный сотрудник лаб. водных экосистем, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия, 184209
эл. почта: denisow@inep.ksc.ru
тел.: +7 (81555) 79776

Даувальтер Владимир Андреевич

главный научный сотрудник лаб. водных экосистем,
д. г. н., проф.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия, 184209
эл. почта: vladimir@inep.ksc.ru
тел.: +7 (81555) 79774

Кашулин Николай Александрович

зам. директора, зав. лаб. водных экосистем, д. б. н., проф.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл.,
Россия, 184209
эл. почта: nikolay@inep.ksc.ru
тел.: +7 (81555) 79378

CONTRIBUTORS:

Denisov, Dmitry

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14 Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk region,
Russia, INEP
e-mail: denisow@inep.ksc.ru
tel.: +7 (81555) 79776

Dauvalter, Vladimir

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14 Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk region,
Russia, INEP
e-mail: vladimir@inep.ksc.ru
tel.: +7 (81555) 79774

Kashulin, Nikolai

Institute of North Industrial Ecology Problems,
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14 Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk region,
Russia, INEP
e-mail: nikolay@inep.ksc.ru
tel.: +7 (81555) 79378