

Карельский научный центр
Российской академии наук

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 9, 2015

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2015

Главный редактор

А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; Т. ВИХАВАЙНЕН, доктор истории, проф.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; С. П. ГРИППА, к. г. н., доцент; Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; А. С. ИСАЕВ, академик РАН, д. б. н., проф.; А. М. КРЫШЕНЬ (зам. главного редактора), д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; И. И. МУЛЛОНЕН, д. фил. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. ОКРЕПИЛОВ, академик РАН, д. э. н.; О. Н. ПУГАЧЕВ, член-корр. РАН, д. б. н.; Ю. В. САВЕЛЬЕВ, д. э. н.; Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; S. P. GRIPPA, PhD (Geog.), Assistant Prof.; A. S. ISAEV, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; A. M. KRYSHEN' (Deputy Editor-in-Chief), DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; I. I. MULLONEN, DSc (Philol.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. OKREPILOV, RAS Academician, DSc (Econ.); O. N. PUGACHYOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); Yu. V. SAVELIEV, DSc (Econ.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); T. VIHAVAINEN, PhD (Hist.), Prof.; A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Редакционная коллегия серии «Лимнология»

С. Д. ГОЛОСОВ, к. ф.-м. н.; Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; С. Ф. КОМУЛАЙНЕН, д. б. н.; Е. А. КУРАШОВ, д. б. н.; М. ЛЕППЯРАНТА, доктор; П. А. ЛОЗОВИК, д. х. н.; Ю. Н. ЛУКИНА, д. б. н.; Л. Е. НАЗАРОВА (зам. ответственного редактора), к. г. н.; Л. А. ПЕСТРЯКОВА, д. г. н.; Т. И. РЕГЕРАНД (ответственный секретарь), к. б. н.; А. РОЗЕНТАУ, доктор; Д. А. СУБЕТТО (зам. ответственного редактора), д. г. н.; А. Ю. ТЕРЖЕВИК, к. т. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ (ответственный редактор), чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; Г. Т. ФРУМИН, д. х. н., проф.

Editorial Board of the Limnology Series

S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); M. LEPPYARANTA, PhD; P. A. LOZOVIK, DSc (Chem.); Yu. N. LUKINA, DSc (Biol.); L. E. NAZAROVA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geogr.); L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. ROZENTAU, PhD; D. A. SUBETTO (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Geog.); A. Yu. TERZHEVIK, PhD (Tech.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.), Prof.

ISSN 1997-3217 (печатная версия)
ISSN 2312-4504 (онлайн-версия)

Зав. редакцией А. И. Мокеева
Адрес редакции: 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
тел. (8142)762018; факс (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru
Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>

ГИДРОФИЗИКА

УДК 556.555.4 (470.22)

ТЕПЛОПОТОК НА ГРАНИЦЕ ВОДА – ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В НЕБОЛЬШОМ ОЗЕРЕ

**Г. Г. Гавриленко, Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов,
Н. И. Пальшин, А. В. Митрохов, А. Ю. Тержевик**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Приводятся результаты многолетних (2007–2013 гг.) круглогодичных непрерывных измерений температуры придонного слоя воды и верхнего слоя донных отложений небольшого мелководного озера. Описывается методика измерений с использованием специальной придонной несущей конструкции. Использование высокочувствительного оборудования в продолжительных измерениях температуры воды с малым шагом по времени (одна минута) позволило получить принципиально новую информацию о переносе тепла вблизи границы водной массы озера с донными отложениями в течение года, включая периоды образования и разрушения ледового покрова.

Ключевые слова: мелководное озеро; термический режим; тепловой поток; донные отложения.

**G. G. Gavrilenko, G. E. Zdrovennova, R. E. Zdrovennov, N. I. Palshin,
A. V. Mitrokhov, A. Yu. Terzhevik. HEAT FLUX AT THE WATER-SEDIMENT
INTERFACE IN A SHALLOW LAKE**

The results of long-term (2007–2013) year-round continuous temperature measurements in the near-bottom water and the top sediment layer of a small shallow lake are reported. The measurement technique using a bottom-mounted platform is described. Owing to the highly sensitive equipment used in the long-term water temperature measurements with a small time step (one minute) we managed to obtain fundamentally new information on heat transfer through the water-sediment interface throughout the year, including the periods of ice cover formation and destruction.

Keywords: shallow lake; thermal regime; heat flux; bottom sediment.

Тепловое взаимодействие водной массы существенно меняется в течение года. На этапе мелководного озера с донными отложениями пе весенне-летнего нагревания происходит

Характеристики приборов с указанием измеряемых параметров, диапазона измерений, точности и разрешающей способности

Прибор	Параметр	Диапазон	Точность	Разрешение
TR-1060	Температура	-5...+35 °С	±0,002 °С	<0,00005 °С
TDR-2050	Давление	0...100 дБ	±0,05 %	<0,001 %
	Температура	-5...+35 °С	±0,002 °С	<0,00005 °С

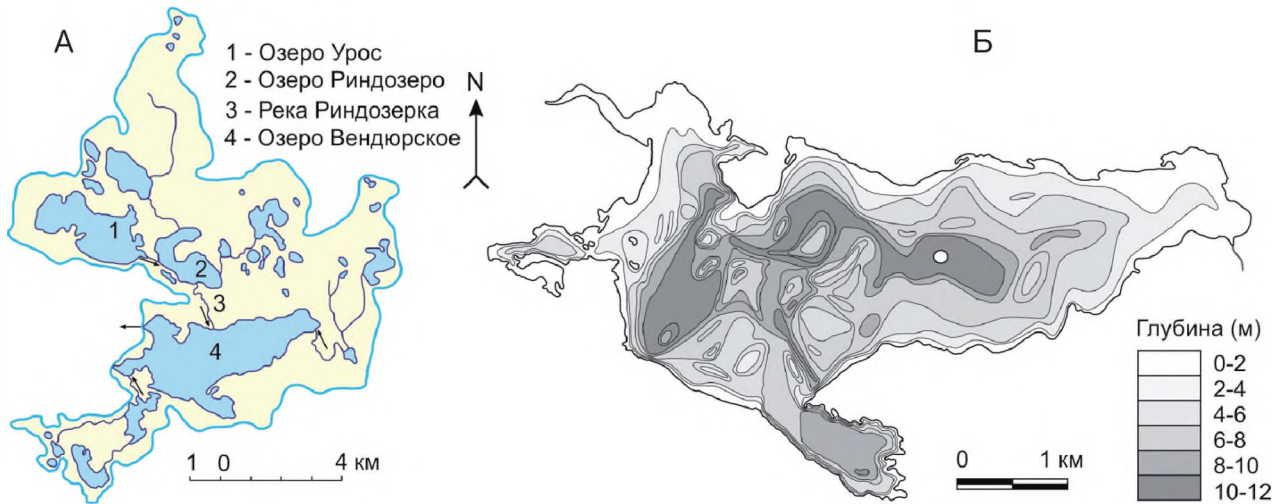


Рис. 1. А – Вендюрская группа озер, водосбор оз. Вендюрского. Б – батиметрия оз. Вендюрского. Станция измерений – белый кружок

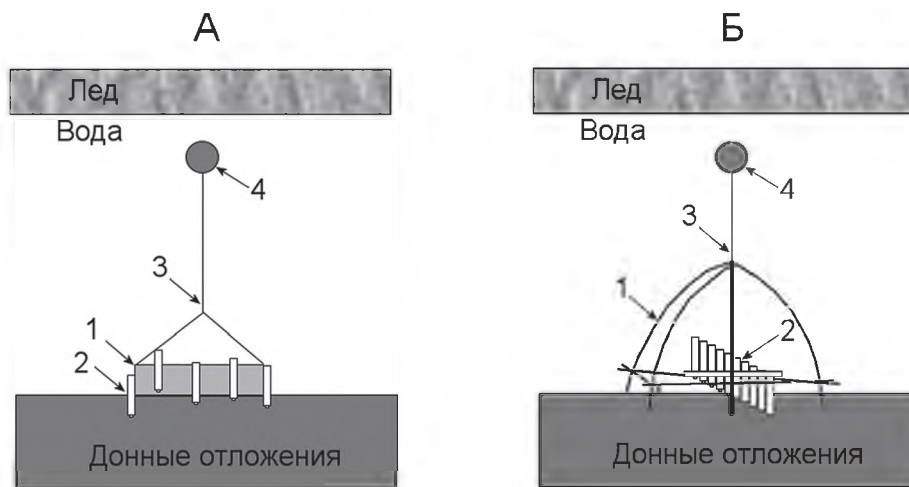


Рис. 2. Схема измерительной станции: А – в период с июля 2007 г. по май 2008 г., Б – с июня 2008 г.

1 – несущая конструкция, 2 – датчики давления и температуры, 3 – кабель, 4 – поплавок

накопление тепла верхним слоем донных отложений, на этапе осеннего охлаждения и в период ледостава тепло переходит из донных отложений в воду. Наиболее активное выхолаживание донных отложений мелководных озер происходит на этапе осеннего охлаждения и непосредственно перед ледоставом. Измерения температуры на небольших озерах показывают, что величина теплового потока вблизи границы вода-дно в предледоставный период и в начале зимы достигает 5–10, к концу зимы снижается до 0,5–1 Вт·м² [Likens, Johnson,

1969; Bengtsson, Svensson, 1996; Kirillin et al., 2009]. Определенная на основании натуральных измерений, величина теплового потока на границе вода-дно используется в моделях, воспроизводящих тепловой бюджет водной массы водоема [Fang, Stefan, 1998], теплоактивного слоя донных отложений [Golosov, Kirillin, 2010]. Сложность параметризации величины теплового потока через границу вода-дно обусловлена как зависимостью его от термофизических свойств грунта [Malm et al., 1996; Ryanzhin, 1997], так и значительной изменчивостью во



Рис. 3. Измерительная конструкция после извлечения из озера в октябре 2011 г. Граница вода – донные отложения хорошо определяется по наличию темного налета на поверхности датчиков

времени и по пространству [Fang, Stefan, 1996; Malm et al., 1997; Zdorovenova, 2009]. В настоящей работе приведены результаты многолетних измерений температуры и оценок теплопотока вблизи границы вода-дно в небольшом мелководном озере, описана методика измерений с использованием современного высокочувствительного оборудования.

Объект исследования – мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное в южной части Карелии ($62^{\circ}10' - 62^{\circ}20'N$, $33^{\circ}10' - 33^{\circ}20'E$). Площадь зеркала озера $10,4 \text{ км}^2$, объем вод $\sim 5,5 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, средняя глубина $5,3 \text{ м}$, максимальная $13,4 \text{ м}$, площадь водосборного бассейна $82,8 \text{ км}^2$ (рис. 1). В озеро впадает р. Риндозерка и несколько небольших ручьев, вытекает р. Кулапдеги, однако объем их стока невелик. Сток с собственного водосбора озера и атмосферные осадки оказывают определяющее влияние на изменения объема озерных вод в течение года. Коэффициент водообмена озера равен $0,4 \text{ год}^{-1}$. Прозрачность воды по диску Секки $3,0 \pm 0,5 \text{ м}$. Донные отложения представляют собой песок на мелководье (на глубинах не более $2-3 \text{ м}$) и коричневые и темно-коричневые илы в глубоководной части озера [Литинская, Поляков, 1975].

В период с июля 2007 г. по октябрь 2013 г. на озере Вендюрском проводились измерения температуры придонной воды и верхнего слоя илов с высоким разрешением по пространству и времени. В центральной глубоководной части

озера на дне на глубине около $11,3 \text{ м}$ находилась придонная платформа, оснащенная высокочувствительными термодатчиками и датчиками давления производства канадской фирмы «RBR Ltd» (см. рис. 1, 2; табл.). Ежегодно в конце мая – начале июня и в середине октября платформа извлекалась из озера на $2-5$ суток для снятия данных, калибровки и перезарядки датчиков, после чего помещалась на прежнее место. Местоположение станции определялось с помощью GPS с точностью $\pm 20 \text{ м}$ по горизонтали. Датчики размещались на несущей конструкции таким образом, что часть их оставалась в придонном слое воды, а другая часть попадала в верхний слой донных отложений. Такое взаимное расположение датчиков позволило в дальнейшем с высокой степенью точности оценить тепловой поток вблизи границы вода-дно, а также проследить его изменение в течение года на масштабах от минут и часов до дней и месяцев. Шаг измерений составлял одну минуту. Логгеры накапливали большой объем информации (за «зимнюю» постановку – более $2,7 \text{ млн}$, за «летнюю» $\sim 2 \text{ млн}$ отсчетов). Данные обрабатывались с использованием пакетов Excel и SciLab.

За время измерений было испытано несколько модификаций измерительной платформы. В период с июля 2007 г. по май 2008 г. датчики крепились к сторонам квадратной несущей конструкции с длиной стороны около 60 см и высотой около 20 см (см. рис. 2, А). Однако такое

размещение датчиков по ряду причин было признано неудачным, и начиная с июня 2008 г. измерительная станция имела вид, схематически изображенный на рис. 2, Б. Десять датчиков были жестко скреплены с вертикальным сдвигом в два см друг относительно друга между двумя металлическими пластинами, соединенными с треногой металлическим прутом. Вся конструкция крепилась к тросу, находящемуся в натянутом состоянии благодаря шару с положительной плавучестью, который располагался на глубине около 2 м от поверхности озера. Таким образом, вероятность того, что датчики в момент постановки измерительной станции в озеро примут вертикальное положение, была достаточно высока. На фотографиях станции, сделанных после извлечения ее из озера, хорошо прослеживается граница вода-ил: датчики, находящиеся в воде, существенно обрастают и покрываются темно-коричневым налетом, в то время как датчики, находящиеся в иле, остаются чистыми (рис. 3).

По данным термодатчиков были оценены потоки тепла вблизи границы вода-дно, которые рассчитывались градиентным методом по формуле:

$$Q_{bw} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z},$$

где Q_{bw} – теплоток вблизи границы вода-дно, Вт·м⁻²; λ – коэффициент молекулярной теплопроводности воды (при 0 °С и атмосферном давлении 0,56 Вт·м⁻¹·°С⁻¹); dT/dz – градиент температуры.

Озеро Вендюрское при открытой воде находится в состоянии слабой термической стратификации, периодически сменяющейся гомотермией, его донные отложения активно накапливают тепло, которое отдают в водную толщу зимой. Этим обусловлен хорошо выраженный годовой ход температуры придонного слоя воды и верхнего слоя донных отложений озера (рис. 4, А). Годовой минимум температуры на границе вода – донные отложения в центральной глубоководной части озера (0,5–1 °С) наблюдается непосредственно перед ледоставом, годовой максимум (16–18 °С) – в конце этапа летнего нагревания озера, годовая амплитуда придонной температуры достигает 17 °С.

В предледоставный период тепловой поток направлен из донных отложений в воду (положительные значения потока на рис. 4, Б). В глубоководной части озера максимальные значения теплоток наблюдаются в течение нескольких дней перед замерзанием озера и достигают 10–15 Вт·м⁻². С появлением сплошного ледового покрова значения теплоток вблизи границы вода-дно резко

уменьшаются до 2–4 Вт·м⁻², затем в течение месяца продолжают постепенно уменьшаться до 1–2 Вт·м⁻², в дальнейшем в течение зимы не превышают 1 Вт·м⁻². При очищении озера ото льда происходит полное перемешивание его водной толщи от поверхности до дна. При этом в течение нескольких часов наблюдается резкое падение температуры на границе вода-дно на 0,5–1 °С (черные стрелки на рис. 4, А). Величина теплоток в этот момент резко возрастает до 5–10 Вт·м⁻² (черные стрелки на рис. 4, Б). Однако в течение нескольких следующих дней по мере роста температуры придонной воды величина теплоток уменьшается до нуля, и он меняет направление: на этапе летнего нагревания тепло переходит из водной толщи в донные отложения (отрицательные значения теплоток на рис. 4, Б). Летом водная толща озера периодически полностью перемешивается, в такие моменты скачкообразно повышается температура придонного слоя центральной глубоководной котловины озера. Величина теплоток, направленного из воды в донные отложения, в июне–июле составляет 5–15 Вт·м⁻². Годовой максимум температуры придонного слоя (пунктирные стрелки на рис. 4, А) достигается в конце июля – начале августа. Величина теплоток, направленного из воды в донные отложения, также достигает максимума и может превышать 20 Вт·м⁻² (пунктирные стрелки на рис. 4, Б). На этапе осеннего охлаждения озера по мере понижения температуры воды величина теплоток, направленного в донные отложения, постепенно уменьшается до нуля. В годы исследований теплоток менял знак в середине сентября, затем его величина постепенно увеличивалась, достигая максимума перед замерзанием озера.

Непрерывные измерения с небольшим шагом по времени в течение года позволяют проследить ряд интересных явлений, таких, например, как изменение направления теплового потока через границу вода – донные отложения, которое продолжается всего несколько часов. Отследить это явление, проводя, допустим, вертикальные зондирования с дискретностью в несколько дней и даже часов, не представляется возможным. На рис. 5 в качестве примера приведено изменение температуры (см. рис. 5, А) и теплового потока (см. рис. 5, Б) в течение 18–19 сентября 2011 г. в верхнем 12-см слое донных отложений и 6-см слое придонной воды в центральной глубоководной части озера Вендюрского.

Изменение направления теплового потока в верхнем 6-см слое донных отложений произошло 19 сентября около 3 ч, в слое

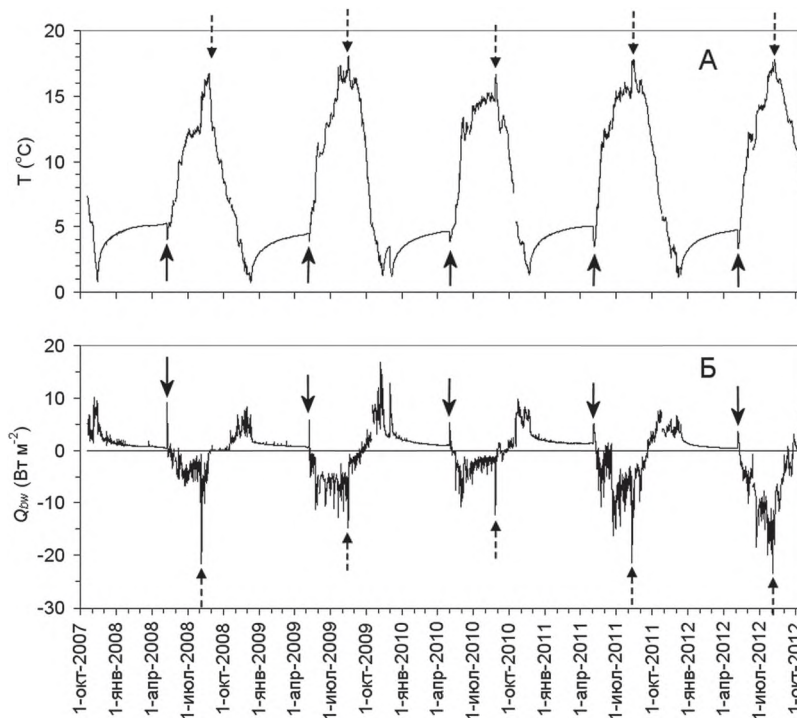


Рис. 4. Температура (А) и теплоток (Б) вблизи границы вода-дно на измерительной станции в период с октября 2007 г. по октябрь 2012 г. Осреднение исходных данных по 3 ч

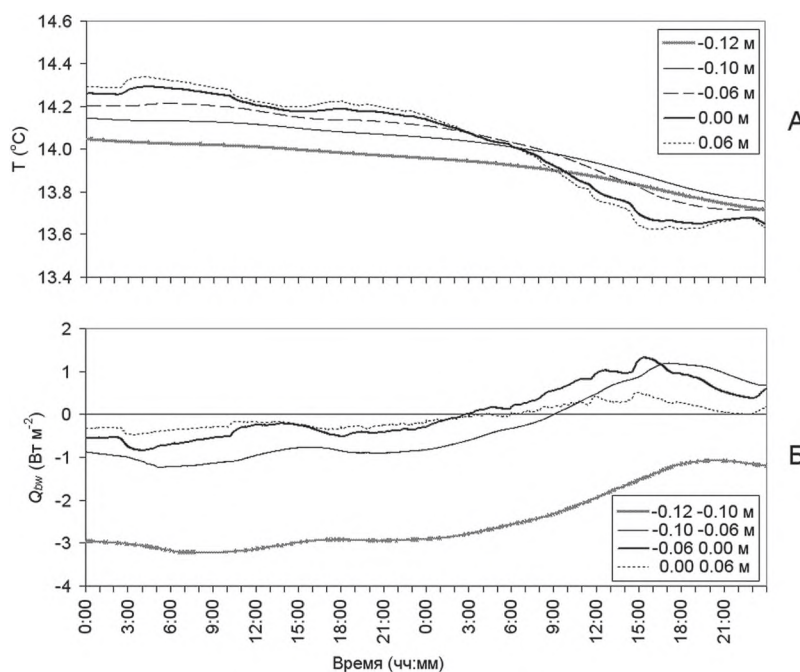


Рис. 5. Изменение температуры (А) и теплоточа (Б) 18–19 сентября 2011 г. в придонном слое воды и верхнем слое донных отложений на измерительной станции

6–10 см – около 10 ч. Величина теплоточа в слое 10–12 см на протяжении 19 сентября уменьшилась в два раза, однако направление его не изменилось. То есть верхний 10-см слой донных отложений начал терять тепло, накопленное на этапе летнего нагревания озера, в то время как нижележащие слои илов продолжали

получать тепло, поскольку их температура была ниже температуры вышележащих слоев.

Таким образом, в ходе исследований отработаны методы измерения температуры верхнего слоя донных отложений и придонного слоя воды. Была разработана конструкция измерительной придонной платформы для длительных

автономных измерений температуры вблизи границы вода-дно (патент на полезную модель №153787 «Автономное устройство для измерения профиля температуры в придонных слоях воды и грунта», зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 7 июля 2015 г., авторы Митрохов А. В., Пальшин Н. И., патентообладатель ИВПС КарНЦ РАН). Использование высокочувствительного оборудования в продолжительных измерениях температуры воды с малым шагом по времени (одна минута) позволило получить принципиально новую информацию о переносе тепла вблизи границы водной массы озера с донными отложениями в течение года. Полученная в ходе более чем пятилетних непрерывных измерений информация позволяет судить о межгодовой, сезонной, синоптической и мелкомасштабной изменчивости температуры и теплового потока вблизи границы вода – донные отложения, включая периоды образования и разрушения ледового покрова.

Авторы глубоко признательны анонимным рецензентам за ценные советы и рекомендации.

Литература

Литинская К. Д., Поляков Ю. К. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1975. С. 57–66.

Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // *Nordic Hydrology*. 1996. Vol. 27. P. 39–56.

References

Litinskaya K. D., Polyakov Yu. K. Oзера Vendyurskoi gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of Vendyury group – Uros, Rindozero, and Vendyurskoe]. *Vodnye resursy Karelii i ikh ispol'zovanie* [Water resources of Karelia and their use]. Petrozavodsk: Karel'skii filial AN SSSR, 1975. P. 57–66.

Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes. *Nordic Hydrology*. 1996. Vol. 27. P. 39–56.

Fang X., Stefan H. G. Dynamics of heat exchange between sediment and water in a lake. *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32 (6). P. 1719–1727.

Fang X., Stefan H. G. Temperature variability in lake sediments. *Water Resources Research*. 1998. Vol. 34 (4). P. 717–729.

Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software*. 2010. Vol. 25. P. 793–801.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer

Fang X., Stefan H. G. Dynamics of heat exchange between sediment and water in a lake // *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32 (6). P. 1719–1727.

Fang X., Stefan H. G. Temperature variability in lake sediments // *Water Resources Research*. 1998. Vol. 34 (4). P. 717–729.

Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // *Environmental Modelling & Software*. 2010. Vol. 25. P. 793–801.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquat. Ecol.* 2009. Vol. 43 (3). P. 641–651.

Likens G. E., Johnson N. M. Measurement and analysis of the annual heat budget for the sediments in two Wisconsin lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1969. Vol. 14 (1). P. 115–135.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995. Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund, 1996. No 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997. No 3213. 203 p.

Ryanzhin S. Thermophysical Properties of lake sediments and water-sediments heat interaction. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University, Lund, Sweden. 1997. Tech. Rep. 3214.

Zdorovenнова G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia) // *Aquatic Ecology*. 2009. Vol. 43 (3). P. 629–639.

Поступила в редакцию 06.02.2015

of ice-covered Lake Müggelsee, Germany. *Aquat. Ecol.* 2009. Vol. 43 (3). P. 641–651.

Likens G. E., Johnson N. M. Measurement and analysis of the annual heat budget for the sediments in two Wisconsin lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1969. Vol. 14 (1). P. 115–135.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995. Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund, 1996. No 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997. No 3213. 203 p.

Ryanzhin S. Thermophysical Properties of lake sediments and water-sediments heat interaction. Department of Water Resources Engineering, Institute of

Technology, Lund University, Lund, Sweden. 1997. Tech. Rep. 3214.

Zdorovennova G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow

ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia). *Aquatic Ecology*. 2009. Vol. 43 (3). P. 629–639.

Received February 6, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Гавриленко Галина Геннадиевна

и. о. младшего научного сотрудника
лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: south.sun.cr@gmail.com
тел.: 89602115561

Здорovenнова Галина Эдуардовна

старший научный сотрудник лаборатории
гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: zdoorovennova@gmail.com
тел.: 89116660369

Здорovenнов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаборатории
гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: 89212209438

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник лаборатории
гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: npalshin@mail.ru

Митрохов Андрей Васильевич

главный гидробиолог лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com

Тержевик Аркадий Юрьевич

зав. лабораторией гидрофизики, к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: ark1948@list.ru

CONTRIBUTORS:

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: south.sun.cr@gmail.com
tel.: 89602115561

Zdoorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdoorovennova@gmail.com
tel.: 89116660369

Zdoorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: 89212209438

Palshin, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru

Mitrokhov, Andrey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1948@list.ru

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.

Keywords: 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 [Разумовский, 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

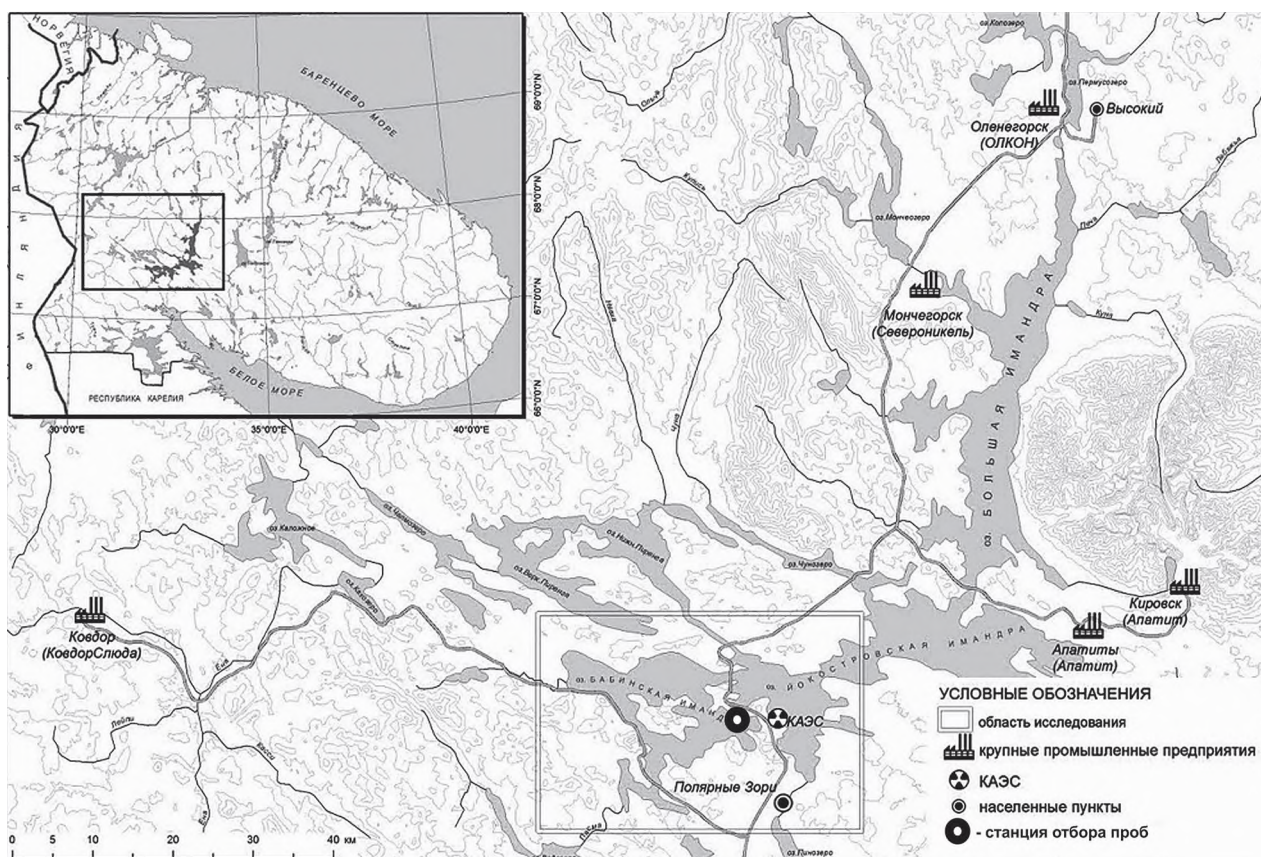


Рис. 1. Карта-схема района исследований и станция отбора проб

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 <i>a</i> , мг/м ³	-	3,47	3,79
Chl <i>b</i> , мг/м ³	-	2,99	1,01
Chl <i>c</i> , 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 [Моисеев, Разумовский, 2009] по следующей формуле: $pH = SpH_i \times k/Sk$, где SpH_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

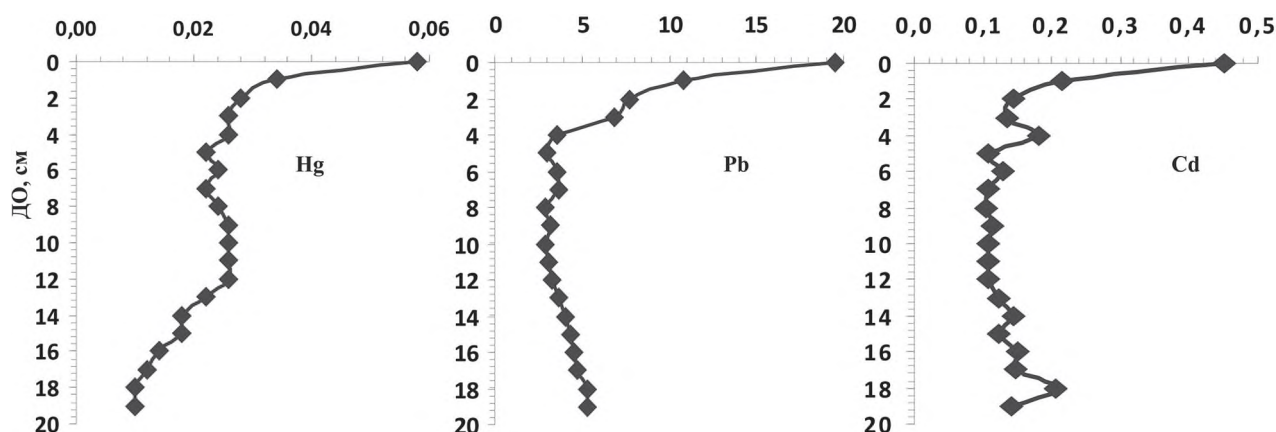


Рис. 2. Динамика содержания некоторых химических элементов (мкг/г) в ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра

и поступления биогенных элементов из Йокостровской Имандры.

Химический состав донных отложений.

Особое внимание было уделено анализу характера распределения в ДО элементов, индицирующих аэротехногенное 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

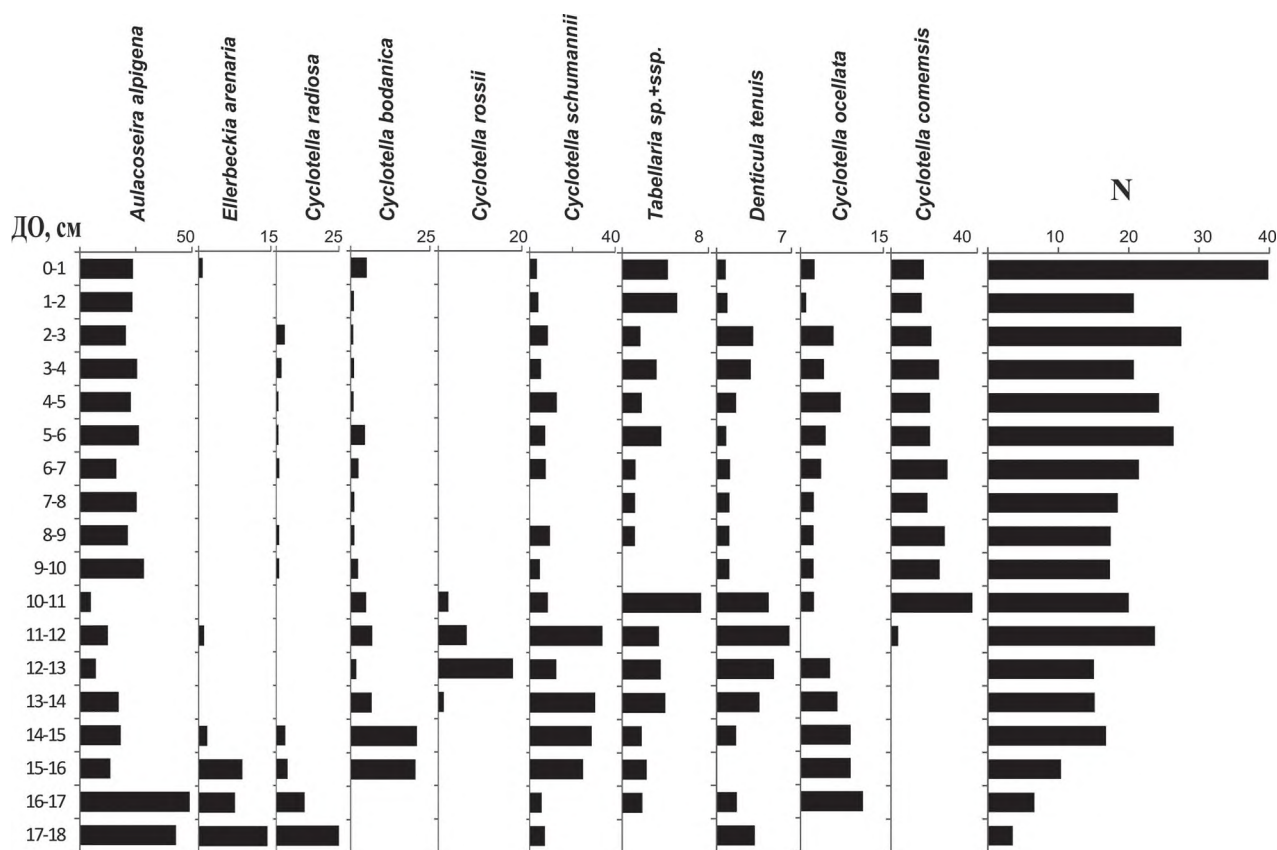


Рис. 3. Диатомовые комплексы ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра: относительная численность (%) наиболее массовых видов, N – численность створок диатомей, млн экз./г сух. в-ва

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

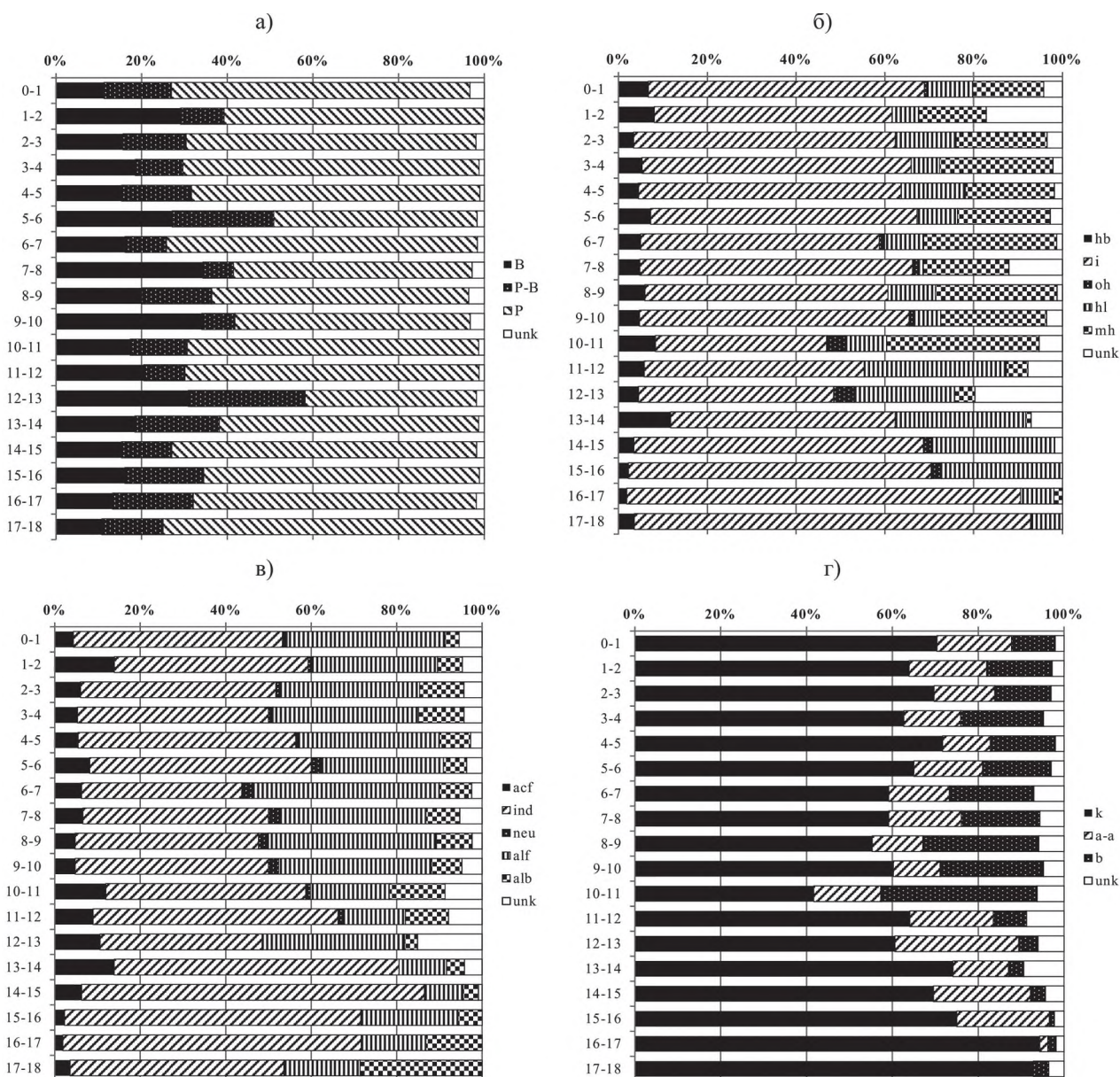


Рис. 4. Соотношение экологических групп диатомей в ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра: а) по отношению к местообитанию (P – планктонные, P-B – планктонно-бентосные, B – бентосные); б) по отношению к солености (hb – галофобы, i – индифференты, oh – олигогалофы, hl – галофилы, mh – мезогалофы); в) по отношению к pH (acf – ацидофилы, ind – индифференты, neu – нейтрофилы, alf – алкалофилы, alb – алкалобионты), 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

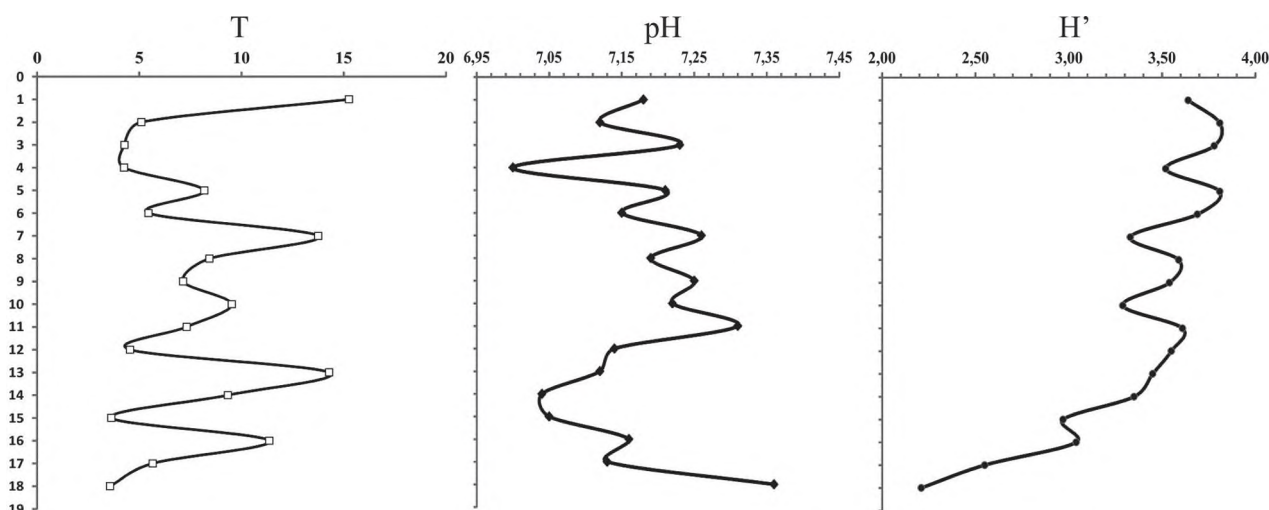


Рис. 5. Динамика некоторых показателей диатомовых комплексов в ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра: Т – доля термофилов, %; рН – значения активной реакции воды, реконструированные по диатомовым комплексам; H' – индекс видового разнообразия Шеннона–Уивера, бит/экз.

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 H' 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

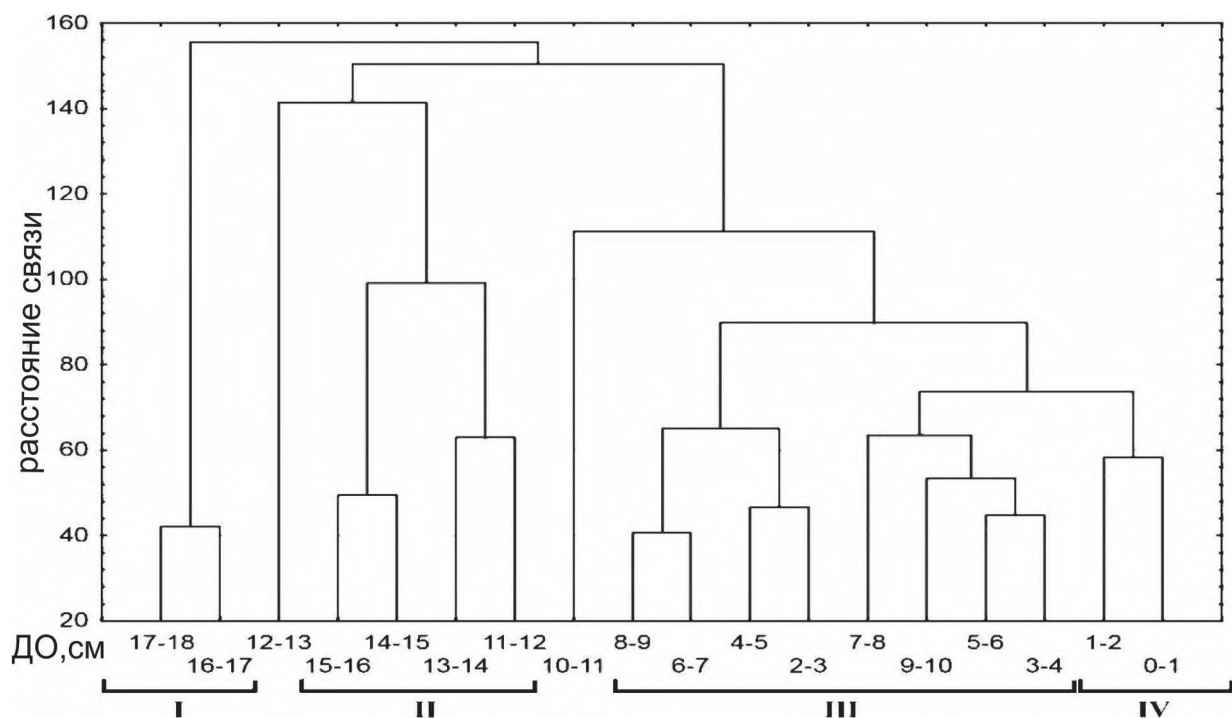


Рис. 6. Классификация слоев ДО губы Молочной оз. Бабинская Имандра на основе соотношения относительной численности диатомей и основные этапы развития экосистемы водоема по результатам кластерного анализа (методом Варда, манхэттенские расстояния)

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.
- Моисеев 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., Окслюк 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 – indikatory 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 vodoroslyvkh 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 sostoyanie 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 sovremennoogo 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., Golobova 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 vozdeystviya 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., Ruhland 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 Fischer 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

УДК 574.98:556.55 (470.22)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФАУНЫ РЯДА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР КАРЕЛИИ (ИССЛЕДОВАНИЯ 2008–2011 ГОДОВ)

Т. П. Куликова, А. В. Рябинкин

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Изложены результаты изучения зоопланктона и зообентоса 19 озер в различных районах Республики Карелия; на ряде из них наблюдения проводились впервые. Рассмотрены особенности фаунистического состава, формирования и развития сообществ в водоемах с разными лимнологическими характеристиками.

Ключевые слова: зоопланктон; зообентос; видовое разнообразие; численность; биомасса; озера.

T. P. Kulikova, A. V. Ryabinkin. CURRENT STATUS OF THE FAUNA IN LAKES OF DIFFERENT TYPES IN KARELIA (BASED ON 2008–2011 SURVEYS)

The results of the study of zooplankton and zoobenthos in 19 lakes in different parts of the Republic of Karelia, some of which were surveyed for the first time, are presented. The faunal composition, formation and development of communities in lakes with different limnological characteristics are considered.

Key words: zooplankton; macrozoobenthos; species diversity; abundance; biomass; lakes.

Введение

Лаборатория гидробиологии Института водных проблем Севера многие годы занимается комплексным исследованием водоемов, многообразием которых на всей территории отличается Республика Карелия. К основным направлениям в изучении карельских водоемов относится их инвентаризация, составление биологического озерного кадастра на основе систематизации сведений, накопленных за многолетний период. Зоопланктон и макрозообентос являются звеньями водных экосистем, которые отслеживаются в рамках экологического мониторинга, проводимого на карельских водоемах с 1992 г. Оценка современного состояния всех элементов биоты, изучение

видового состава, количественных характеристик биоценозов, включая и тенденции их изменения, является важной задачей в решении проблемы сохранения биоразнообразия – важнейшего показателя состояния экосистемы. К настоящему времени составлен довольно обширный список видов зоопланктона, включающий свыше 650 таксонов из более чем 900 озер и рек Карелии [Куликова, 2001, 2013]. Известно о местонахождении свыше 1000 видов и форм бентоса для более чем 200 больших и малых озер республики [Озера..., 2013].

Многолетние исследования на территории Карелии позволяют отметить неравномерность изучения фауны по водоемам. Имеющиеся списки видов не исчерпывают всего ее разнообразия. В связи с тем, что наблюдения

зачастую носили рекогносцировочный характер, не все группы изучены равномерно, в частности Rotatoria, Oligochaeta, Mollusca. До сих пор недостаточно исследованными остаются озера восточного и юго-восточного побережий Онежского озера, западной части Карелии, а также глубоководные водоемы северной (Топозеро, Пяозеро) и средней Карелии (Селецко-Маслозерская группа), не испытывающие активного антропогенного воздействия.

Наиболее ранние сведения по гидробиологии озер, включенных в исследования 2008–2011 гг., получены в основном в 50–60-е годы прошлого столетия (Гимольское – 1948, Сундозеро – 1930-е, 1950, Лососинское – 1955, Сандаал – 1953, Лижмозеро – 1930-е, 1950–1956, 1963). Публикации, подготовленные по результатам этих наблюдений, содержат довольно краткую информацию, главным образом о структуре зообентоса [Герд, 1946; Беляева, Покровский, 1958; Александров и др., 1959; Озера..., 1959; Гордеева, 1961; Кутикова, 1965; Филимонова, 1965, 1969]. Позднее в основном небольшие по объему наблюдения были продолжены на озерах Сандаал (1987), Маслозеро (2008), Селецкое (1991, 2008), Сундозеро (2000–2001) и Шапшозеро (1996) [Куликова, 2007, 2010]. На целом ряде озер – Елово-Горское (бассейн р. Кеми), Чинозеро, Хейзъярви, Кучозеро (бассейн ББК), Ройк-Наволоцкое, Суккозеро (бассейн р. Суны), Машозеро (бассейн р. Лососинки), Каргиозеро, Вожъярви (бассейн рек Вуоксы–Лендерки) – зоопланктон в 2008–2011 годах изучался впервые.

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на получение современных сведений о видовом составе фауны, особенностях формирования и развития планктонных и бентосных сообществ водоемов в различных районах Республики Карелия.

Материалы и методы

Исследования выполнены по программам научно-исследовательских тем Института водных проблем Севера «Оценка состояния и ресурсного потенциала озер Карелии» и, совместно с Институтом биологии КарНЦ РАН, «Подготовка научно обоснованной схемы рационального и эффективного размещения объектов экономической деятельности на водных объектах Муезерского района Республики Карелия».

В основе работы – данные сборов 71 пробы зоопланктона и 55 количественных и качественных проб зообентоса, полученные в ходе полевых исследований на 19 водоемах

в летний период 2008–2011 и в предыдущие годы, а также фондовые и литературные сведения по этим озерам.

Пробы зоопланктона отбирали планктонной сетью Джеди (диаметр 18 см, сито с размером ячеек газового конуса 0,076–0,168 мм). В крупных и средних водоемах применялся послойный лов в зависимости от глубины станции (2–0, 5–2 и далее с обловом 5- или 10-метрового слоя). В мелководных водоемах, где глубина не превышает 3–4 м, пробы отбирались тотально (от дна до поверхности). Пробы фиксировались 40%-м формалином (до разбавления 4,0 %). При обработке материалов применялись стандартные методики [Киселев, 1969]. Вычисление биомассы зоопланктона (сырой формалиновый вес) происходило с учетом размеров организмов [Балушкина, Винберг, 1979]. Видовая принадлежность устанавливалась по известным определителям. Анализ изменений сообщества в водоемах под влиянием антропогенных факторов проводился с применением индикационных показателей [Макрушин, 1974; Куликова, 1983; Андроникова, 1996].

Отбор проб зообентоса проводился дночерпателем Экмана–Берджа с площадью захвата 225–300 см². Пробы промывались через сито с диаметром пор 0,3–0,5 мм и фиксировались 40 %-м раствором формалина до концентрации в пробе 4,0 %. Камеральная обработка включала разбор проб по общепринятым систематическим группам. Выбор организмов из грунта проводился с использованием микроскопа МБС-9 (при увеличении 8-х) в модифицированной камере Богорова. Взвешивание организмов проводили в сыром виде с точностью 0,0001 г. Разобраный и взвешенный материал фиксировался 70%-м этанолом. Таксономическая идентификация проводилась с использованием определителей фауны СССР и России [Определитель..., 1977, 1999; Панкратова, 1970, 1977, 1983]. Параметры трофности рассчитаны по С. П. Китаеву [1984, 2007].

Водоемы различаются по своим физико-географическим параметрам и степени антропогенного воздействия, что позволяет оценить особенности развития планктонных и бентосных сообществ. Одна часть исследованных озер принадлежит бассейну Белого моря, другая – бассейну Балтийского моря. В Северном районе Карелии находятся: Тикшеозеро (бассейн р. Ковды), Елово-Горское (бассейн р. Кеми), Чинозеро, Хейзъярви и Кучозеро (бассейн Беломорско-Балтийского канала), в Центральном районе: Селецкое и Маслозеро (бассейн р. Сегежи), Ройк-Наволоцкое, Суккозеро, Гимольское, Сундозеро, Палье, Сандаал

(бассейн р. Суны), в Южном районе: Лижмозеро (бассейн р. Лижмы), Лососинское, Машозеро (бассейн р. Лососинки), Шапшозеро (бассейн р. Свири), Каргиозеро и Вожъярви (бассейн р. Вуоксы).

По площади зеркала озера относятся к малым (до 10 м²) и средним (10–100), лишь Тикшеозеро (209,0), Санда (185,0) и Палье (100,2) – к большим. Максимальная глубина изменяется от менее 10 до 75,1 м (Маслозеро), средняя – у большинства озер менее 10 м (2,6–9,7) и только в трех (Селецкое, Палье, Маслозеро) превышает этот показатель (16,9–25,7). Водоемы имеют ледниковое, ледниково-тектоническое или моренное происхождение.

По химическим показателям, которые определяются климатом и геологическими особенностями региона, озера являются типичными водными объектами Республики Карелия [Лозовик, 2006]. Вода большинства озер отличается низкой минерализацией (41,1–49,7 мг/л), имеет слабокислую реакцию среды (рН 5,7–6,8), содержит органическое вещество гумусной природы (среднегодовая цветность 30–50 град., перманганатная окисляемость 10,0–18,0 мгО/л). В ряде случаев отмечена повышенная цветность воды и высокое содержание железа. Концентрация азота и фосфора, особенно их минеральных форм, невелика. Насыщение кислородом удовлетворительное, изменяется за небольшим исключением в пределах 80–95 %.

Результаты и обсуждение

В составе планктонной фауны обследованных озер было отмечено 53 таксона, в том числе Rotatoria – 20, Copepoda – 9, Cladocera – 24 (прил. 1). Большинство видов, создающих основной фон зоопланктона в водоемах, являются обычными для озер Европейского Севера. В основном это эвритопные организмы, широко распространенные в карельских водоемах. Озера достаточно сходны и по составу доминирующего комплекса сообщества, типичного для бореальной зоны [Куликова, 2001]. Количество таксонов в озерах изменялось от 9 (Шапшозеро) до 34 (Гимольское). Согласно данным с учетом предшествующих наблюдений, более разнообразным видовым составом характеризуется зоопланктон озер Лососинского (32 таксона), Лижмозера (68), Санда (102). В существующие списки зоопланктона этих озер, а также Маслозера, Палье (Пальезера), Сундозера (Сунозера) включены не опубликованные ранее данные К. Стенрооса и Г. Ю. Верещагина из

архива Олонецкой научной экспедиции [Герд, 1946; Куликова, 2007, 2010].

Разнообразие видового состава планктоценозов в водоемах определяют кладоцеры и коловратки. Массовыми в зоопланктоне большинства озер были *Eudiaptomus gracilis* (Sars 1863), *Heterocope appendiculata* (Sars 1863), *Eurytemora lacustris* (Poppe 1887), *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863), *Mesocyclops leuckarti* (Claus 1857), *Daphnia cristata* Sars 1862, *Daphnia longispina* O. F. Müller 1785, *Diaphanosoma brachyurum* Liévin 1848, *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller 1785), *Bosmina obt. lacustris* Sars 1862, *B. longirostris* (O. F. Müller 1785), *Leptodora kindtii* (Focke 1844), а из коловраток – *Kellicottia longispina* (Kellicott 1879), *Asplanchna priodonta* Gosse 1850, *Bipalpus hudsoni* (Imhof 1891), *Keratella cochlearis* (Gosse 1851). В девяти наиболее глубоководных озерах обитает реликтовый рачок *Limnocalanus*. К числу доминирующих относились обычно 3–4 вида. На мелководных участках с зарослями макрофитов разнообразие фауны естественно возросло за счет ветвистоусых, обычных представителей зарослевого и литорального комплексов (*Polyphemus pediculus* (Linnaeus 1778), *Ophryoxus gracilis* Sars 1862, *Alona*), значительнее также была роль коловраток, главным образом *Kellicottia* и *Asplanchna*. Индекс видового разнообразия сообщества (по численности) варьировал от 0,93 (Шапшозеро) до 3,0 (Маслозеро).

Количественные показатели изменялись в широких пределах: численность – от 1,3–2,7 (Маслозеро, Палье) до 62,0–70,0 (Лососинское, Машозеро) тыс. экз./м³, биомасса – от 0,037–0,068 до 2,5–3,1 г/м³ в тех же озерах.

В составе зообентоса озер нами отмечено 54 таксона различного ранга (прил. 2). Доминирующий комплекс зообентоса большинства исследованных озер в основном образован представителями трех систематических групп: Chironomidae, Oligochaeta и Mollusca. В ряде озер (Тикшеозеро, Маслозеро, Селецкое, Санда, Сундозеро) в него входит комплекс реликтовых Crustacea (*Pallasiola quadrispinosa* (Sars 1867), *Monoporeia affinis* Lindström 1855, *Mysis relicta* Lovén 1868). В озерах Хейзъярви, Каргиозеро, Вожъярви значительна роль личинок хаборуса.

По численности и по биомассе почти во всех озерах доминируют хирономиды (*Procladius*, *Trissocladius*, *Tatytarsus*, *Chironomus*, *Polypedilum*, *Stictochironomus* и др.). Количественные показатели также значительно варьируются по озерам: средняя численность – от 266 (Елово-Горское) до 2422 (Сундозеро) экз./м²,

Таблица 1. Количественные показатели и соотношение основных групп зоопланктона водоемов, 2008–2011 гг.

Глубина, м	Численность, тыс. экз./м ³	Соотношение основных групп, %				Биомасса, г/м ³	Соотношение основных групп, %			
		Cala-noida	Cyclo-poida	Clado-cera	Rotatoria		Cala-noida	Cyclo-poida	Clado-cera	Rotatoria
Бассейн р. Ковды										
Тикшеозеро (159). 04.08.2010										
40,0	5,1	6	49	29	16	0,125	9	29	40	23
9,0	5,2	30	45	3	23	0,160	27	16	7	49
4,5	5,6	17	55	2	26	0,091	35	30	3	32
2,5	6,9	13	31	2	55	0,072	14	24	5	57
2,0	5,3	3	17	11	68	0,166	2	3	19	76
Бассейн р. Кеми										
Елово-Горское (532). 18.08.2011										
4,0	11,0	4	27	37	31	0,404	3	5	29	63
Бассейн Беломорско-Балтийского канала (ББК)										
Чинозеро (721). 24.08.2011										
24,5	5,9	12	39	25	24	0,157	27	16	37	20
Хейзъярви (725). 25.08.2011										
14,5	10,2	3	55	28	14	0,233	6	29	54	11
Кучозеро (830). 18.08.2011										
5,5	12,5	25	27	36	11	0,331	25	10	48	18
Бассейн р. Сегежи										
Селецкое (705). 09.08.2008										
49,0	3,7	12	42	11	36	0,054	48	15	27	11
Маслозеро (772). 07.08.2008										
73,0	1,3	2	20	40	38	0,037	2	15	47	36
31,0	5,6	3	11	5	81	0,210	3	10	14	73
Бассейн р. Суны										
Ройк-Наволоцкое (1758). 30.07.2009										
22,0	17,0	1	27	58	14	0,506	1	8	79	12
Суккозеро (1769). 01.08.2009										
23,0	10,5	8	21	40	30	0,358	41	6	47	6
Гимольское (1779). 31.07.2009										
28,0	9,3	13	31	40	15	0,248	24	13	61	2
Сундозеро (1820). 11.09.2008										
30,0	11,3	27	51	20	2	0,232	25	28	43	3
Палье (1828). 10.09.2008										
50,0	2,7	31	31	23	15	0,068	47	13	38	3
Сандал (1831). 05.09.2008										
33,0	3,6	26	42	15	16	0,074	42	18	34	6
Бассейн р. Лижмы										
Лижмозеро (1839). 09.09.2008										
13,0	21,4	12	39	31	18	0,491	11	17	61	11
Бассейн р. Лососинки										
Лососинское (Лососинное) (1635). 11.08.2009										
6,0	62,0	2	39	30	29	2,474	2	9	28	62
Машозеро (1636). 10.08.2009										
5,0	69,9	2	51	25	22	3,129	2	10	24	64
Бассейн р. Свири										
Шапшозеро (1501). 11.08.2009										
2,5	6,9	1	89	8	2	0,040	1	41	40	18
Бассейн рек Вуоксы-Лендерки										
Каргиозеро (1020). 21.08.2011										
10,0	7,0	15	13	35	38	0,179	4	5	54	36
Вожъярви (1068). 20.08.2011										
15,0	11,8	14	47	29	10	0,267	16	22	59	3

Примечание. Указана дата отбора проб, в скобках – номер озера в [Каталог..., 2001].

Таблица 2. Вертикальное распределение зоопланктона

Гориз., м	2-0		5-2		10-5		20-10		40-20	
	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б
Тикшеозеро										
04.08.2010	10,8	0,242	6,6	0,256	2,7	0,051	2,2	0,044	6,3	0,151
04.08.2010	8,2	0,352	5,2	0,130	3,8	0,087				
Елово-Горское										
18.08.2011	12,6	0,504	9,5	0,304						
Чинозеро										
24.08.2011	13,8	0,577	20,0	0,379	5,8	0,077	1,8 ¹	0,079		
Хейзъярви										
25.08.2011	33,8	0,981	8,3	0,161	4,4	0,083	7,1 ²	0,100		
Кучозеро										
18.08.2011	15,9	0,312	10,3	0,343						
Селецкое										
09.08.2008	17,5	0,167	12,2	0,109	10,5	0,140	2,3	0,056	1,0 ³	0,025
Маслозеро										
07.08.2008	0,80	0,015	1,4	0,030	1,9	0,054	1,8	0,058	1,6 ⁴	0,048
Ройк-Наволоцкое										
30.07.2009	35,9	1,218	21,6	0,416	27,3	0,954	7,7	0,198		
Суккозеро										
01.08.2009	64,4	1,323	13,4	0,204	5,6	0,119	2,9	0,335		
Гимольское										
31.07.2009	26,2	0,512	26,1	0,498	11,7	0,306	4,2	0,174	2,9 ⁵	0,129
Сундозеро										
11.09.2008	16,4	0,345	17,4	0,360	15,0	0,273	8,8 ⁵	0,190		
Палье										
10.09.2008	11,6	0,159	7,3	0,132	7,3	0,201	4,3	0,111	0,4 ⁶	0,018
Сандал										
05.09.2008	9,3	0,160	6,6	0,098	7,0	0,168	2,5	0,055	1,4 ⁷	0,030
Лижмозеро										
09.09.2008	49,6	1,125	30,7	0,675	9,3	0,230				
Лососинское										
11.08.2009	122,6	4,845	27,5	1,120						
Машозеро										
10.08.2009	64,4	2,973	75,4	3,286						
Каргиозеро										
21.08.2011	9,8	0,324	9,3	0,173	4,3	0,118				
Вожъярви										
20.08.2011	16,6	0,329	13,5	0,287	8,2	0,180	12,7 ⁸	0,328		

Примечание. ч – численность, тыс. экз./м³; б – биомасса, г/м³; 1,8¹ – 24–10 м; 7,1² – 14–10 м; 1,0³ – 48–20 м; 1,6⁴ – 50–20 м, 0,5 тыс. экз./м³ и 0,013 г/м³ в слое 50–72 м; 2,9⁵ – 27–20 м; 8,8⁵ – 29–10 м; 0,4⁶ – 50–20 м; 1,4⁷ – 32–20 м; 12,7⁸ – 14–10 м.

средняя биомасса от 0,15 (Палье) до 9,50 г/м² (Шапозеро).

Бассейн р. Ковды. Зоопланктон Тикшеозера (Тикшеозера) впервые был исследован в июле–августе 1951 г. [Потапова, 1959]. Согласно этим довольно ограниченными сведениям, средняя численность организмов была невелика, составила 2,4 тыс. экз./м³ с преобладанием кладоцер (50 %). Роль копепод (молодь и науплиусы) и коловраток была значительно меньше (соответственно 29 и 21 %). В августе 2010 г. в зоопланктоне озера нами определено 24 таксона (см. прил. 1). В глубоководной части водоема (наибольшая глубина 40 м, средняя – 8) доминировали копеподы

(более половины общей численности и биомассы), на мелководных участках эта роль переходила к коловраткам. К числу массовых видов относились *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863), *Bosmina obt. lacustris* Sars 1862, *Asplanchna priodonta* Gosse 1850 и *Kellicottia longispina* (Kellicott 1879). На отдельных участках среди доминантов отмечены *Eudiaptomus* и *Heteroscope*, на мелководных – превалировали те же коловратки. Уровень развития организмов в целом был невысоким: численность составляла 5,1–6,9 тыс. экз./м³, биомасса – 0,072–0,166 г/м³, более населенными летом были верхние слои воды (табл. 1, 2). Температураводных масс в озере изменялась от 19,6 °С в слое

Таблица 3. Количественные показатели и соотношение основных групп зообентоса исследованных озер

Водоем	Год	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Chironomidae		Oligochaeta		Mollusca		Прочие	
				Ч %	Б %	Ч%	Б%	Ч%	Б%	Ч%	Б%
Тикшеозеро	2010	1009	1,68	21	9	23	16	17	15	39	60
Елово-Горское	2011	266	0,31	100	100	0	0	0	0	0	0
Чиозеро	2011	622	3,88	21	13	21	3	56	84	0	0
Хейзъярви	2011	622	3,15	36	72	7	1	29	5	28	22
Кучозеро	2011	400	5,29	67	96	11	1	11	2	11	1
Селецкое	2008	1038	0,73	35	52	47	31	0	0	18	17
Маслозеро	2008	1929	2,02	22	14	26	31	17	13	35	42
Ройк-Наволоцкое	2009	1464	4,61	8	21	90	78	0	0	2	1
Суккозеро	2009	1107	1,69	8	8	60	45	31	46	1	1
Гимольское	2009	1914	4,31	14	22	81	71	5	7	0	0
Сундозеро	2008	2422	4,36	31	36	56	59	6	4	7	1
Палье	2008	415	0,15	40	60	60	40	0	0	0	0
Сандал	2008	588	0,66	47	55	32	20	18	20	3	5
Лижмозеро	2008	1107	0,94	25	52	47	26	28	22	0	0
Каргиозеро	2011	399	1,31	67	56	0	0	22	27	11	17
Вожъярви	2011	977	3,48	9	6	18	3	14	26	59	65
Лососинское	2009	456	0,35	18	28	75	66	6	5	1	1
Машозеро	2009	1868	0,96	85	49	0	0	9	38	6	13
Шапшозеро	1996	1045	9,50	95	99	0	0	0	0	5	1

Примечание. Ч% – относительная численность организмов, Б% – относительная биомасса.

0,5 и 5,0 м до 19,0 °С на 10 м и 16,6 °С на глубине 43 м.

В составе зообентоса Тикшеозера летом 1951 г. было отмечено 23 таксона: Chironomidae, Oligochaeta, Mollusca (*Lymnaea*, *Planorbis*, *Valvata*, *Pisidium*, *Sphaerium*, *Anodonta*), Crustacea (*Mysis relicta* Lovén, *Monoporeia affinis* Lindström), Odonata, Plecoptera, Coleoptera, Ephemeroptera (*Heptagenia*, *Ephemera*), Trichoptera. Средняя численность организмов составила 343 экз./м², средняя биомасса – 0,357 г/м² [Потапова, 1959]. Наши исследования показали, что в бентоценозах доминировали те же основные группы. Показатели численности и биомассы зообентоса изменялись в различных участках водоема от 100 экз./м² и 0,22 г/м² в зоне максимальных глубин до 1800 экз./м² и 2,56 г/м² в прибрежных участках. Средние для озера величины существенно превышали отмеченные ранее (табл. 3). При этом на долю реликтовых ракообразных по-прежнему приходится свыше 40 % численности и 60 % от общей биомассы зообентоса.

Бассейн р. Кеми. В мелководном озере Елово-Горское (Челгозеро), являющемся плесовым участком р. Чирко-Кемь, в августе 2011 г. при температуре воды во всей толще 17 °С преобладали (16 таксонов) кладоцеры (*Daphnia cullata cucullata* G. O. Sars 1862, *Bosmina obt. lacustris*) и коловратки (*Asplanchna priodonta*), заметную долю в сообществе составлял *Thermocyclops oithonoides*. Уровень количественного развития организмов был значительно выше, чем в Тикшеозере (см. табл. 1).

Донная фауна бедна как количественно, так и качественно. В ее составе в этот период были отмечены только личинки Chironomidae рода *Procladius*. Показатели численности и биомассы организмов не превышали 266 экз./м² и 0,31 г/м² (см. табл. 3).

Бассейн Беломорско-Балтийского канала (ББК). Зоопланктон озер Маслозеро и Селецкое (бассейн р. Сегежи) в первой декаде августа 2008 г. включал соответственно 26 (Rotatoria – 11, Copepoda – 7, Cladocera – 8) и 23 (Rotatoria – 5, Copepoda – 7, Cladocera – 11) таксона (см. прил. 1). С. В. Герд [1946] для Маслозера приводит список (по данным К. Steenroos) из 10 видов кладоцер. К числу массовых в озерах можно отнести *Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides*, *Bosmina obt. lacustris*, *Daphnia cristata*, *Kellicottia longispina*, а также *Asplanchna priodonta* в первом и *Conochilus unicornis* Rousselet 1892 – во втором. В указанных озерах обитает реликтовый рачок *Limnocalanus macrurus* Sars 1863.

Количественные показатели зоопланктона в этих глубоководных (максимальная глубина Маслозера 75,1 м, Селецкого – 56,0, средняя соответственно 25,7 и 16,9) олиготрофных водоемах невелики. В поверхностных слоях воды численность организмов увеличивается за счет коловраток (до 80 % от общей) (см. табл. 1, 2).

Значительная часть планктона – в глубоководной зоне Маслозера, максимальная плотность зоопланктона отмечена в средних и нижних слоях воды. Зоопланктон оз. Селецкого характеризовался прямой стратификацией

в распределении организмов в толще воды с преобладанием кладоцер в верхних слоях и мелких циклопов – в нижних (см. табл. 2).

В небольших, значительно более мелководных озерах Кучозеро, Чинозеро и Хейзъярви (средняя глубина 4,2–5,2 м; максимальная 13,1 м) к числу массовых видов зоопланктона при общем количестве 18–19 таксонов принадлежат в общем те же виды (см. прил. 1). Структура зоопланктонных сообществ характеризовалась преобладанием циклопов и кладоцер (до 40–50 % общей численности и биомассы), при этом в Хейзъярви наблюдалось наиболее высокое содержание ветвистоусых рачков (более 50 %), в Кучозере – каланид (25 %). Уровень развития организмов зоопланктона значительно превышал отмеченный в глубоководных Маслозере и Селецком как в среднем в водной толще, так и в верхних слоях воды (см. табл. 1, 2).

В доминирующем комплексе зообентоса озер Маслозеро и Селецкое отмечены Crustacea (*Pallasiola quadrispinosa* (Sars 1867), *Monoporeia affinis* Lindström 1855, *Mysis relicta* Lovén 1868, *Gammarus lacustris* G. O. Sars 1863), Oligochaeta, Chironomidae (*Monodiamesa bathyphila* Kieffer 1911, *Procladius* sp., *Trissocladius potamophilus* (Tshernovskij 1949), *Trissocladius parataticus* (Tshernovskij 1949)), Mollusca (*Euglesa*). Индекс разнообразия Шеннона в период исследований составил 3,12 бит./экз. В зоне максимальных глубин (свыше 20 м) преобладали олигохеты, на долю которых приходилось свыше 60 % численности и 70 % биомассы макробентоса. В зоне берегового склона значительную часть сообщества составляли реликтовые амфиподы (40 и 50 % соответственно). Средняя численность организмов в оз. Маслозеро составила 1929 (1760–2500) экз./м² при средней биомассе 2,02 (0,60–3,45) г/м².

В зообентосе глубоководных участков оз. Селецкое в период наших исследований были отмечены только Chironomidae (*Procladius*, *Tanytarsus*, *Trissocladius parataticus*), Oligochaeta и Crustacea (*Pallasiola quadrispinosa*, *Monoporeia affinis*). Средняя численность зообентоса составила 1038 экз./м² при средней биомассе 0,73 г/м². Доминировали как по численности, так и по биомассе малощетинковые черви и личинки хирономид (см. табл. 3).

В составе сообществ зообентоса небольших озер Кучозеро, Чинозеро и Хейзъярви в августе 2011 г. отмечены Chironomidae (*Procladius*, *Chironomus*, *Sergentia longiventris* Kieffer 1924), моллюски (Bivalvia), Oligochaeta, личинки Chaoborus и Ephemeroptera. Средняя численность организмов сравнительно невысока и варьировалась по озерам от 400 (Кучозеро)

до 622 (Чинозеро, Хейзъярви) экз./м². Вместе с тем за счет обилия в озерах Кучозеро и Хейзъярви крупных личинок хирономуса средние значения биомассы зообентоса составили от 3,15 (Хейзъярви) до 5,29 (Кучозеро) г/м², что характерно для мезотрофных водоемов (см. табл. 3).

Бассейн р. Суны. Верхняя часть бассейна р. Суны характеризуется наличием небольших озерно-речных систем с центральным озером Гимольское. Исследования здесь проводились Карельским филиалом АН СССР в 1947–1949 гг. в связи с проектированием Валламинского водохранилища. В июле 1968 г. в этих водоемах наиболее подробно была изучена высшая водная растительность [Клюкина, 1975]. Имеются также, хотя и достаточно небольшие, сведения по бентосу озер Ройк-Наволоцкое, Гимольское, Суккозеро, опубликованы очень кратко. Из всей группы озер лишь для оз. Гимольского приводятся краткие данные по зоопланктону за август 1948 г. – по количеству видов (31) и общей численности организмов (6,65 тыс. экз./м³, в том числе кладоцеры – 51 %, копеподы – 25 %) [Озера..., 1959].

В июле 2009 г. в зоопланктоне обследованных озер отмечено от 24–25 в Ройк-Наволоцком и Суккозере до 34 таксонов в Гимольском (см. прил. 1). В число массовых видов входят *Eurytemora lacustris*, *Thermocyclops oithonoides*, *Daphnia cristata*, *Kellicottia longispina*. В Ройк-Наволоцком озере к ним добавляются *Mesocyclops leuckarti* (Claus 1857), *Bosmina obt. lacustris*, *Asplanchna priodonta*, а в Суккозере – *Limnocalanus*. Значительную долю в сообществе как в Гимольском, так и в Ройк-Наволоцком составляют кладоцеры, в Суккозере – каланоиды, в том числе на *Limnocalanus* приходится более 30 % биомассы. Уровень количественного развития организмов в этих водоемах, особенно в верхних слоях воды, соответствует таковым в мезотрофных водоемах (см. табл. 1, 2).

В донной фауне оз. Суккозеро в августе 2009 г. были отмечены Oligochaeta, Mollusca (*Euglesa*), Chironomidae (*Procladius*). Средние величины численности (1107 экз./м²) и биомассы (1,69 г/м²) организмов невелики и находятся на уровне, характерном для олиготрофных водоемов. Как по численности, так и по биомассе преобладают олигохеты и двустворчатые моллюски (см. табл. 3).

По данным В. А. Соколовой [1959], в состав бентофауны оз. Ройк-Наволоцкого входили хирономиды, ручейники, поденки, моллюски и олигохеты. Главным ее компонентом являлись хирономиды, максимальная численность которых на отдельных станциях достигала 977 экз./м². Второе место занимали олигохеты.

Средняя биомасса донной фауны в оз. Ройк-Наволоцком – 0,83 г/м², средняя численность – 408 экз./м². В июле 2009 г. в составе донной фауны озера встречаются Oligochaeta, Chironomidae (*Tanytarsus*, *Procladius*). Количественные показатели существенно (в 3–5 раз) превышали отмеченные ранее. Средняя численность превышала 1400 экз./м², средняя биомасса – 4,60 г/м². Свыше 90 % от общей численности и 78 % общей биомассы приходилось на долю малощетинковых червей.

Донная фауна оз. Гимольского, согласно материалам, полученным в августе 1948 г., состояла главным образом из Chironomidae (14 видов) (*Tanytarsus*, *Procladius*), Oligochaeta, Mollusca. Кроме того, в озере обитали ручейники, поденки и представители других групп бентоса. Средняя его численность составляла 550 экз./м², средняя биомасса – 1,88 г/м². Около 27 % биомассы составляли поденки *Ephemera vulgata* Linné 1758 (хирономиды – 15 %, моллюски – 16 %, олигохеты – 11 %, стрекозы – 11 %, ручейники – 5 %) [Соколова, 1959]. В августе 2009 г. были выявлены существенные структурные и количественные изменения в зообентосе, в сравнении с ранее полученными данными. Значительно, почти в 4 раза, выросли показатели его средней численности и почти в 2 раза – средней биомассы (см. табл. 3). На первое место в бентоценозе вышли Oligochaeta (80 % численности и 70 % биомассы), потеснив доминировавших ранее личинок насекомых. В настоящее время по продуктивности бентоса озеро Гимольское можно отнести к классу мезотрофных водоемов.

Нижний участок бассейна р. Суны включает крупные озера Палье (пл. 100,2 км²) и Сандал (185,0 км²). Начало гидробиологическим наблюдениям на этих водоемах, проведенным в 1920 г. до превращения их в водохранилища, было положено Олонецкой научной экспедицией под руководством Г. Ю. Верещагина.

Список видов рачкового зоопланктона оз. Сандал, являвшегося в начальный период изучения типичным олиготрофным водоемом, насчитывал 59 видов и форм, коловраток – лишь 3. Сведения о зоопланктоне оз. Палье, водоема глубоководного и холодноводного, очень ограничены; упоминаются лишь два вида копепоид – *Eudiaptomus gracilis* (Sars 1863) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863) [Герд, 1946]. В июле–августе 1950–1953 гг. достаточно детальные рыбохозяйственные исследования были выполнены экспедицией Карельского отделения ГосНИОРХ. Для оз. Палье приводятся данные по высшей водной растительности, представленной маловидовыми, дискретными,

разреженными группировками, а также по составу и количественному развитию донной фауны, в значительной мере обедненной. Сведения о планктонной фауне отсутствуют [Александров, Смирнов, 1959].

Список зоопланктона оз. Сандал включал 26 наименований, в том числе отмечался и реликтовый рачок *Limnocalanus*, входивший в его состав и ранее. В основной комплекс планктона пелагиали входили кладоцеры *Holopedium*, *Daphnia cristata*, *Bosmina longirostris* (O. F. Müller 1785), *B. coregoni coregoni* (Baird 1857), *B. obtusirostris* Sars 1862. В прибрежье отмечены *Chydorus*, а также копепоиды – *Thermocyclops oithonoides* и *Eurytemora lacustris* (Poppe 1888). Средние для озера количественные показатели составили 21,2 тыс. экз./м³ и 0,35 г/м³, а без учета литорали – соответственно 11,5 и 0,10. Колебание общей численности и биомассы организмов по участкам в открытой части озера, обусловленное, в частности, разной степенью проточности, было значительным. Численность изменялась от 1,1 до 36,9 тыс. экз./м³, а биомасса – от 0,025 до 0,690 г/м³. В зарослевой литорали величина биомассы планктона достигала 31,8 г/м³, а численности – 61,4 тыс. экз./м³. Основная масса рачков была сосредоточена, как обычно, в поверхностном слое. С учетом литорали она превышала 30,9 тыс. экз./м³, в то время как глубинные слои воды были чрезвычайно обеднены [Гуляева, 1958; Гордеева-Перцева и др., 1959; Гордеева, 1961].

По результатам наших исследований, в середине июля 1987 г. в составе зоопланктона оз. Сандал было выявлено 22 таксона. При этом состав массовых видов не изменился. Основу численности сообщества составляли коловратки (63 %), а биомассы – кладоцеры (67 %). Около 40 % общего числа организмов приходилось на *Kellicottia longispina*, в биомассе доминировала *Bosmina obtusirostris* (60 %). Количественные показатели рачкового планктона составили в среднем 36,9 тыс. экз./м³ и 0,33 г/м³. Сравнительно высокие количественные показатели были отмечены в поверхностном слое воды – 88,8 тыс. экз./м³ и 0,76 г/м³ (см. табл. 1, 2).

В первой декаде сентября 2008 г. при температуре воды в поверхностном слое 11,7–12,6 °С, а в придонном – 6,2–8,3 °С в планктоне озер Сандал и Палье доминировали *Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides*, *Daphnia cristata* и *Kellicottia longispina*. До 60 % общей численности и биомассы соответственно сезону года приходилось на копепоид, а общие количественные показатели были невысоки, закономерно снижались в нижних слоях воды,

где до 50 % биомассы планктона составлял *Limnocalanus* (см. табл. 1, 2).

В зоопланктоне наименее исследованного оз. Палье отмечен 21 таксон: Rotatoria – 5, Copepoda – 7, Cladocera – 9 (см. прил. 1). Общий список зоопланктона оз. Сандал в настоящее время включает 105 таксонов, в том числе Rotatoria – 12, Copepoda – 27, Cladocera – 66 [Куликова, 2007]. В целом следует отметить, что в систематическом отношении зоопланктон этого озера имеет довольно полный список ракообразных, значительно меньше известно о коловратках. В сравнении с рядом крупных и средних водоемов южной Карелии планктон озера довольно богат, и оно может быть включено в группу α -мезотрофных озер со средним количеством рачков от 10 до более 30 тыс. экз./м³ и биомассой от 0,25 до 0,50 г/м³ [Урбан, 1962; Гордеева-Перцева, Гордеева, 1968].

В зоопланктоне малопроточного олигогумусного оз. Сундозеро, по данным В. В. Урбан, в августе 1950 г. было отмечено 26 таксонов [Александров, Александрова, 1959]. Среди них обычные для водоемов Карелии виды, в том числе в небольшом количестве встречался *Limnocalanus*. Средняя численность рачков в озере летом (при температуре воды 14–15 °С в верхних и 11–12 °С в нижних слоях воды) была низкой, всего 4,2 тыс. экз./м³. В поверхностном слое этот показатель составил 16,2 тыс. экз./м³, а глубже 10 м снижался до 1,2 тыс. экз./м³.

Наши наблюдения в октябре 2000 и 2001 гг. показали, что к числу доминирующих видов из 25 отмеченных в этот период принадлежали *Eudiaptomus gracilis* и *Daphnia longispina hyalina* (до 30 % общего веса каждый). В целом основу биоценоза составляли клadoцеры (*D. cristata*, *B. obt. lacustris*, *B. crassicornis*) – до 50 % общей численности и 60–70 % биомассы. Уровень количественного развития организмов был невысоким и составил в среднем 2,6 тыс. экз./м³ и 0,10 г/м³. В верхнем слое воды эти показатели увеличивались соответственно до 15,8 и 0,66 (11,0–25,3 тыс. экз./м³ и 0,40–0,95 г/м³).

В первой декаде сентября 2008 г. в зоопланктоне водоема при температуре воды в слое 0,5 м – 12,2 °С, а на глубине 29,0 м – 8,0 °С зафиксировано 22 таксона. Массовыми среди них были *Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides*, *Mesocyclops leuckart* и *Daphnia cristata*. Циклопы (на разных стадиях развития) составляли основную долю (50 %) численности сообщества. В биомассе доминировала *D. cristata* (в среднем более 30 % от общей, в слое 0–10 м – до 80 %), которую

дополняли *Daphnia longispina*, *Diaphanosoma*, *Ceriodaphnia*, *Chydorus*. Суммарная численность организмов составила 11,3 тыс. экз./м³, биомасса – 0,23 г/м³, в верхних слоях воды показатели увеличивались до 16,4–17,4 и 0,36 соответственно (см. табл. 1, 2).

Донная фауна озера Палье, судя по материалам 50-х годов прошлого века (1950–1953 гг.), была развита слабо как в качественном, так и в количественном отношении и формировалась в основном из хирономид, олигохет, моллюсков рода *Pisidium* и нематод. Превращение озера в водохранилище вызвало исчезновение некоторых реликтовых рачков, в частности понтопореи. Исключение составлял рачок мизис (*Mysis relicta*), сохранившийся в озере в 1950 г., но встречаемый очень редко. На основной площади дна водоема фауна сильно обеднена: численность не превышала 100 экз./м², а биомасса – 10 г/м². Средняя численность организмов составляла 300 экз./м², средняя биомасса – 0,20–0,25 г/м². Около 40 % биомассы приходилось на долю олигохет, 33 % – хирономид, около 22 % – двусторчатых моллюсков [Александров, Смирнов, 1959]. В 2008 г. количественные показатели зообентоса были близки к ранее наблюдавшимся. Средняя его численность составляла 415 экз./м², средняя биомасса – 0,15 г/м². Около 60 % приходилось на Chironomidae, а 40 % – на Oligochaeta.

До превращения в водохранилище оз. Сандал было типичным олиготрофным водоемом. Пропуск через Сандал гумифицированных вод р. Суны и регулярные подъемы и сработки уровней воды в водохранилище изменили в худшую сторону условия существования для донных организмов. Показатели биомассы донной фауны, по исследованиям летнего периода 1953 г., в различных частях озера колебались от 0,05 до 0,25 г/м², при показателях численности от 114 до 133 экз./м². Средняя величина биомассы для всего водоема составляла 0,07 г/м², при средней численности 129 экз./м². В зообентосе доминировали олигохеты (40 %), хирономиды (около 35 %), пизидиум (около 11 %), а прочие группы занимали подчиненное положение [Гордеева-Перцева и др., 1959; Гордеева-Перцева, 1961].

В июле 1982 г. средние количественные и структурные параметры зообентоса не претерпели существенных изменений. Основу бентоценозов по-прежнему определяли Chironomidae (около 50 % численности и 30 % биомассы) и Oligochaeta (около 35 % численности и биомассы). Средние количественные величины также были крайне низкими (109 экз./м² и 0,17 г/м²).

В сентябре 2008 г. донная фауна была более богата качественно, в ее составе зафиксировано 23 таксона. Наиболее разнообразны хирономиды (18 видов). Кроме того, встречались Oligochaeta, Bivalvia, Crustacea и Ceratopogonidae. Количественные показатели по-прежнему были низки, хотя существенно выше отмеченных ранее. Средняя биомасса составила 0,66 г/м², средняя численность – 588 экз./м². Возможно, это связано с сезонной динамикой развития личинок хирономид как доминирующей группы зообентоса (около 50 %) (см. табл. 3).

В составе донной фауны озера Сундозеро летом 1950 г. были отмечены хирономиды, олигохеты, нематоды, моллюски и реликтовые ракообразные (понтопорея, палласея, мизис). На каменистых грунтах прибрежной зоны также были встречены ручейники, поденки, веснянки и др. Средняя величина биомассы донной фауны составляла 0,40 г/м² (хирономиды 43 %, олигохеты 23 %, пизидиум 10 %, палласея 10 %, мизис 13 %), средняя численность – 367 экз./м² (олигохеты 45 %, хирономиды 36 %). Максимальная биомасса, отмеченная в этот период, достигала 1,33 г/м² [Александров, Александрова, 1959].

В сентябре 2008 г. в зообентосе озера было обнаружено 25 таксонов различного ранга. Наибольшим разнообразием отличалась фауна Chironomidae – 17 видов, доминировали виды родов *Tanytarsus*, *Trissocladius*, *Monodiamesa*, *Procladius*. Также повсеместно были распространены Oligochaeta, моллюски (*Pisidium*, *Lymnaea*, *Planorbis*), Ceratopogonidae. Сохранился полный комплекс ледниковых реликтов (*Monoporeia affinis*, *Pallasiola quadrispinosa*, *Mysis relicta*).

Количественные характеристики в период последних исследований значительно превышали отмеченные ранее. Средняя численность донных организмов возросла до 2422 экз./м², а средняя биомасса – до 4,36 г/м². Основу профундальных бентоценозов составляли олигохеты и хирономиды (см. табл. 3).

Бассейн р. Лижмы (северо-западное побережье Онежского озера). О з е р о Л и ж м о з е р о является является наиболее крупным (пл. 84,8 км², ср. глуб. 5,6, макс. – 22 м) водоемом в бассейне. Имеет моренное происхождение. Степень влияния водосборного бассейна на водоем невелика.

Зоопланктон Лижмозера, согласно исследованиям разных лет (1950–1956, 1963), представлен 95 таксонами, в том числе Rotatoria – 24, Sorperoda – 19, Cladocera – 47, Ostracoda – 5 [Куликова, 2007]. Больших изменений в его структуре за указанный период изучения не отмечено. Круглогодично в планктоне обитает *Daphnia*

cristata. В летний период отмечена высокая численность *Thermocyclops oithonoides* (60–80 % составляют науплии и копепоидиты). Из кладоцер, на долю которых приходится свыше половины биомассы, чаще других доминируют *Chydorus*, *Diaphanosoma*, *Limnosedra* и *Ceriodaphnia*. В октябре зоопланктон характеризуется массовым развитием *Bosmina obt. lacustris* и обилием коловраток, прежде всего *Asplanchna priodonta* и *Kellicottia*, а также копепод.

В первой декаде сентября 2008 г. при температуре в поверхностном слое 12,3 °С, а в придонном – 12,1 °С в планктоне среди 20 определенных таксонов преобладали те же виды – *E. gracilis*, *T. oithonoides*, *M. leuckarti*, *D. cristata*, *A. priodonta*, *K. longispina* (см. прил. 1). Основную долю биомассы (0,50 г/м³) составляли кладоцеры (60 %), в том числе *D. cristata* (до 50 %), а в придонных слоях воды – *D. longispina* (более 20 %), обитающая в водоемах подобного типа (см. табл. 1, 2).

По численности и биомассе зоопланктона оз. Лижмозеро, согласно всем исследованиям, может быть отнесено к группе среднепродуктивных β-мезотрофных озер Карелии. Эти показатели составляли в августе 1963 г. 20,4 (5,0–40,0) тыс. экз./м³ и 0,37 (0,20–0,50) г/м³, а в октябре – соответственно 16,5 (13,0–20,0) и 0,60 (0,43–0,76). В сентябре 2008 г. средние значения численности и биомассы составили соответственно 21,4 и 0,49 (в слое 0–2 м 49,6 и 1,12). Эти значения оказались близки к величинам, отмеченным летом 1950–1956 гг., когда они составляли 18,7 тыс. экз./м³, достигая в слое 0–2 м – 25,0–53,6 тыс. экз./м³. Индекс сапробности характеризовал воды озера как α-мезосапробные.

В начале 50-х годов прошлого столетия основное место по биомассе в составе зообентоса занимали личинки поденок (преимущественно *Ephemera vulgata*). На их долю приходилось свыше 40 % суммарной биомассы. Далее следовали личинки хирономид (около 23 %), моллюски (около 10 %), олигохеты и сиалис. Биомасса бентоса летом составляла в среднем для озера 2,81 г/м², при средней численности 739 экз./м² [Беляева, Урбан, 1959].

По материалам, полученным в сентябре 2008 г., в зообентосе было отмечено 15 таксонов, в том числе Oligochaeta, Chironomidae (*Procladius*, *Pagastiella orophila*, *Tanytarsus*), Mollusca, Ephemeroptera (*Ephemera vulgata*). Как по численности, так и по биомассе доминировали олигохеты, хирономиды и моллюски. Средняя численность организмов составила 1107 экз./м². Средняя биомасса снизилась в 3,5 раза – до 0,94 г/м². Это произошло в основном в результате исчезновения из

ценозов крупных личинок поденок, место которых заняли мелкоразмерные формы Chironomidae (см. табл. 3).

Бассейн р. Лососинки. Озера Лососинское (пл. 8,1 км²) и Машозеро (9,1 км²) являются наиболее крупными в бассейне р. Лососинки (пл. водосбора 302 км²). Созданы в начале 18 века и входят в число старейших водохранилищ на территории страны.

Водосборная площадь водоемов (Лососинское – 101 км², Машозеро – 51,8) покрыта лесом с болотами. Вследствие мелководности (ср. глуб. 2,9 и 3,2 м, макс. – 7,5 и 5,9 соответственно) температурная стратификация в озерах выражена слабо, водная толща хорошо прогревается (в поверхностном слое до 20–23 °С). Поступающие с довольно большого водосборного бассейна гумифицированные воды, а также массовое цветение летом и осенью синезеленых водорослей (*Aphanizomenon flos-aquae*) оказывают значительное влияние на качество воды. Как и другим карельским водоемам дистрофированного типа, указанным озерам характерна слабая минерализация воды, наличие гумусовых органических веществ (окисляемость 6,7–11,4 мгО/л), низкие показатели рН (6,3–7,1) и прозрачности (1,0–1,2 м), темно-желтый, коричневый цвет воды, сравнительная бедность биогенными элементами ($P_{\text{мин}}$ 0,012–0,017 мг/л), относительно большое содержание железа (0,22–0,84 мг/л). Содержание растворенного в воде кислорода летом не снижается до уровня менее 80 % насыщения. Площадь зарастания озера высшей водной растительностью довольно высокая, изменяется от 0,3 % на севере до 9,5 % общей площади на юге.

Озеру Лососинскому посвящена работа монографического характера, в которой обобщаются материалы, собранные экспедициями Карельского пединститута и Карельского отделения ВНИОРХ в 1949, 1955–1956 годах. [Александров и др., 1959]. Более кратко эти сведения опубликованы в справочнике «Озера Карелии» [1959]. В статье этого же издания, посвященной оз. Машозеро, данные по зоопланктону отсутствуют.

Планктонная фауна оз. Лососинское представлена обычными для мелководных водоемов Карелии видами коловраток и ракообразных. Всего определено 32 таксона, в том числе Rotatoria – 6, Copepoda – 5, Cladocera – 21 [Куликова, 2007]. В июле–августе 1955–1956 гг. значительного количественного развития из ветвистоусых рачков достигали *Daphnia cristata*, *Chydorus sphaericus*, *Holopedium*, *Bosmina longispina*, *Leptodora*, среди копепод – циклопы *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops*

oithonoides, а из коловраток – *Kellicottia longispina* и *Asplanchna priodonta*. В зарослевой литорали видовое богатство увеличивалось; помимо босмин (*B. longirostris*, *B. obt. lacustris*) здесь обитают *Alona*, *Acroperus*, *Ceriodaphnia*, *Polyphemus*. Зоопланктон в литорали достигал высокой численности (55,1 тыс. экз./м³) и биомассы (2,2 г/м³) исключительно за счет кладоцер. В поверхностном слое пелагиали (0–2 м) средние значения численности и биомассы не превышали 34,1 тыс. экз./м³ и 0,76 г/м³. Средняя величина численности рачков для водной толщи составила 27,4 тыс. экз./м³, биомасса – 0,66 г/м³. В августе 1956 г. количество рачков увеличивалось до 57,2 тыс. экз./м³.

В первой декаде августа 2009 г. основу сообщества составляли циклопиды, кладоцеры и коловратки, среди которых преобладали *Mesocyclops leuckarti*, *Bosmina coregoni gibbera* и *Asplanchna priodonta* (см. табл. 1). Как и в 60-е годы, роль каланид (*Eudiaptomus*) была минимальной (2 %). Количественные показатели увеличивались до 62,0 тыс. экз./м³ и 2,5 г/м³, особенно высокого уровня развития зоопланктон достигал в верхнем слое воды – 122,6 и 4,85 соответственно (более 80 %) (см. табл. 2).

В зоопланктоне оз. Машозеро в этот период зафиксировано 20 таксонов (см. прил. 1). Сообщество отличалось высокой долей среди циклопов *Mesocyclops leuckarti*, а среди коловраток – *Asplanchna priodonta*, каждый из которых составлял до 30 % общей численности. Значительного развития достигали кладоцеры, в том числе дафнии – *D. longispina* и *D. cucullata*. Количественные показатели развития организмов были высоки – 69,9 тыс. экз./м³ и 3,13 г/м³. В связи с мелководностью озера зоопланктон, отличаясь значительной плотностью, был равномерно распределен в толще воды (см. табл. 1, 2).

В целом оба озера, по наблюдениям в 2009 г., можно отнести к водоемам с повышенной продуктивностью зоопланктона. Индекс сапробности изменялся в пределах 2,55–2,92, соответствуя α-мезосапробным условиям.

В составе донной фауны озера Лососинского в 1955–1956 гг. определено около 100 таксонов. Наиболее разнообразно были представлены хирономиды (37 форм) и моллюски (17 видов). Остальные группы (ручейники, поденки, жуки, олигохеты, водяные клещи и др.) не имели большого видового разнообразия. В бентосе иловой зоны доминировали хирономиды (*Procladius*, *Cryptocladopelma viridula*, *Tanytarsus gr. gregarius*, *Polypedilum scalaenum*, *Chironomus*) и *Bivalvia*. Зимой встречено много хаборуса. Средняя величина биомассы

бентоса, рассчитанная для всего водоема летом, составила 1,45 г/м² при средней численности 1052 экз./м². В структуре бентоса доминировали хирономиды (75 % численности и 48 % биомассы). На втором месте находились двустворчатые моллюски (12 и 20 % соответственно). Прочие группы занимали подчиненное положение [Александров и др., 1959].

За последние 50 лет в структуре зообентоса озера произошли существенные изменения. В августе 2009 г. доминирующее положение в нем заняли малощетинковые черви. Их доля в общей численности и биомассе сообщества достигла 65–75 %. Личинки хирономид находились на втором месте, как по численности, так и по биомассе (18 и 28 % соответственно). Средняя численность снизилась почти в два раза и составила 456 экз./м², а средняя биомасса – в 4 раза, до 0,35 г/м², что характерно для олиготрофных водоемов с низкой продуктивностью зообентоса (см. табл. 3).

Донная фауна оз. Машозеро в июле 1949 г. как в количественном, так и в качественном отношении была довольно бедна и однообразна. Средняя биомасса бентоса составляла 0,72 г/м² при средней численности 569 экз./м². Основную роль в составе бентоса илисто-песчаных и илистых грунтов играли двустворчатые моллюски, на долю которых приходилось более 80 % биомассы и численности. Второе место принадлежало крупным формам хирономид *Chironomus sp.* Вместе с гелеидами они составляли 14 % биомассы и 18 % численности. Из других групп бентоса в озере были представлены олигохеты, пиявки, моллюски (*Lymnaea*, *Valvata*, *Planorbis*, *Anodonta*), стрекозы, ручейники, поденки. Высшие ракообразные отсутствовали [Гордеев, 1959].

В августе 2009 г. в зообентосе были отмечены Chironomidae (*Procladius*, *Tanytarsus*, *Trisocladius zalutschicola*, *Chironomus*), Mollusca (*Euglesa*) и личинки *Chaoborus*. Индекс разнообразия составил 2,28. В сравнении с материалами 1949 г., в структуре сообществ существенно сократилась доля моллюсков (с 80 до 9 % по численности и с 80 до 38 % по биомассе). Доминирующая роль перешла к Chironomidae. Существенно, более чем в 3 раза, увеличилась общая численность организмов зообентоса, в основном за счет мелкоразмерных форм хирономид. Показатель средней биомассы по-прежнему находится на довольно низком уровне (менее 1 г/м²), характерном для олиготрофных озер (см. табл. 3).

Бассейн р. Свири. Гидробиологические исследования на оз. Шапшозеро (пл. 0,80 км², глубина в среднем 2,0 м) впервые были

проведены Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН во второй декаде октября 1996 г. при температуре в толще воды 0,2 °С [Оценка..., 1996].

Зоопланктон озера характеризовался бедным видовым составом и невысоким количественным развитием организмов, что было связано как со временем отбора проб, так и с экологическими условиями в водоеме. Всего отмечалось 14 таксонов. Доминировал *Cyclops vicinus*, на долю которого приходилось 30–60 % общей численности и 80–90 % общей биомассы зоопланктона, эврибионтный вид, распространенный в пелагиали озер, в том числе и мелких, с максимумом развития в зимний и весенний периоды. Среди кладоцер чаще других встречались *Ilyocryptus*, *Leydigia* и *Pleuroxus* – обычные обитатели илистых грунтов, прибрежных участков водоемов. Представители пелагиальных видов (*Daphnia* и *Bosmina obt. lacustris*) были малочисленны. Коловратки были представлены главным образом одним видом – *Synchaeta sp.* (0,8–4,7 тыс. экз./м³), в биомассе ее роль благодаря небольшому индивидуальному весу невелика. Общая численность организмов изменялась от 1,5 тыс. экз./м³ в центральной части озера (глуб. 2,0 м) до 18,2 – в прибрежной (глуб. 1,7 м), а биомасса – от 0,033 до 1,0 г/м³ соответственно (см. табл. 1).

В августе 2009 г. в зоопланктоне было определено всего 9 таксонов (см. прил. 1). В нем доминировали мелкие циклопы (до 90 % общего числа организмов), главным образом науплии и копеподитные стадии *Mesocyclops leuckarti*. В биомассе, как обычно летом, увеличивается роль кладоцер – *Bosmina obt. lacustris*, *Diaphanosoma*, *Chydorus*, а среди коловраток – *Asplanchna*.

Донная макрофауна озера в этот период была представлена организмами трех систематических категорий – Chironomidae, Mollusca (*Bivalvia*), Ceratopogonidae. Основу фауны как по численности, так и по биомассе составляли личинки родов *Chironomus*, *Procladius*, *Tanytarsus*, *Polypedilum*, *Pseudochironomus*. Прочие группы занимают подчиненное положение. На долю крупных личинок мотыля приходится 99 % биомассы макрозообентоса и 95 % его общей численности. В целом макробентос характеризовался бедным видовым составом при высоком количественном развитии. Средняя биомасса в период исследования составила 9,5 г/м², при колебании численности организмов от 490 экз./м² (в центральной части озера) до 1600 экз./м² (в литорали) (см. табл. 3). По продуктивности зообентоса озеро можно отнести к β-мезотрофному классу.

Бассейн рек Вуоксы–Лендерки. Два небольших озера в бассейне оз. Лексозеро – Вожъярви (пл. 3,9 км², ср. глуб. 4,8 м, макс. – 6,1) и Каргиозеро (пл. 17,7 км², ср. глуб. 6,6 м, макс. 16,3) были обследованы в рыбохозяйственных целях во второй декаде августа 2011 г.

В зоопланктоне озер Вожъярви и Каргиозеро отмечено 20 и 25 таксонов соответственно. Массовым развитием отличаются *Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides*, *Bosmina coregoni*, *Asplanchna priodonta*, *Kellicottia longispina*. В Каргиозере основную часть общей численности и биомассы составляют кладоцеры (*Bosmina coregoni* до 30–40 %) и коловратки, в Вожъярви увеличивается доля копепод (*Thermocyclops oithonoides* более 30 %). Озеро Вожъярви, более мелководное и менее проточное, характеризуется более высоким уровнем развития организмов как в среднем по водоему, так и в распределении их по всей толще воды (температура воды в слое 0,5 м составила 15,4 °С, в придонном – 14,4 °С). С учетом других гидробиологических показателей данное озеро может быть отнесено к мезотрофным водоемам (см. табл. 1, 2).

В состав донной фауны озер Вожъярви и Каргиозеро входили личинки *Chaoborus sp.*, Chironomidae (*Procladius sp.*, *Stictochironomus crassiforceps*, *Limnochironomus nervosus*), моллюски (*Bivalvia*) и Oligochaeta.

Руководящей группой зообентоса в мелководном оз. Вожъярви являются личинки хаоборуса. На их долю приходится около 60 % численности и 65 % биомассы сообщества. Малощетинковые черви, двустворчатые моллюски и личинки хирономид занимают подчиненное положение. Средняя численность бионтов составила 977 экз./м², средняя биомасса – 3,48 г/м², что соответствует α-мезотрофному классу водоемов. В зообентосе оз. Каргиозеро как по численности, так и по биомассе доминируют Chironomidae (*Procladius sp.*). Двустворчатые моллюски и личинки *Chaoborus* играют второстепенную роль. Средняя численность организмов не превышает 400 экз./м², а средняя биомасса – 1,31 г/м², что характерно для водоемов с низкой продуктивностью зообентоса (см. табл. 3).

Заключение

Таксономический состав сообществ в исследованных водоемах, расположенных в разных районах Республики Карелия, имеет общие черты. В зоопланктоне и в зообентосе представлены эвритопные виды, широко распространенные в водоемах республики. Достаточно сходны водоемы и по составу доминирующего

комплекса видов, типичных для бореальной зоны. В наиболее глубоководных озерах обитают реликтовые ракообразные – *Limnocalanus*, *Pallasiola*, *Monoporeia*, *Mysis relicta*. Величина информационного индекса Шеннона для большинства обследованных озер составляет не ниже 2,5–2,9 (зоопланктон) и 2,0–3,5 (бентос), что указывает на довольно высокий уровень биоразнообразия в биоценозах.

Различия в основном касаются количественных показателей, которые могут изменяться в довольно широких пределах в соответствии с физико-географическими особенностями водоемов. Невысокая хозяйственная освоенность большинства водосборов определяет в целом невысокий класс трофности, который варьируется от олиго- до α-мезотрофного. Минимальные показатели численности (1,3–5,2 тыс. экз./м³) и биомассы (0,04–0,20 г/м³) зоопланктона относятся к глубоководным олиготрофным озерам Селецкое, Палье, Тикшеозеро, максимальные (62,0–69,0 и 2,5–3,1 соответственно) – к озерам Лососинское и Машозеро (бассейн р. Лососинки). Количественные показатели развития зообентоса также значительно варьируются в разных озерах: средняя численность – от 266 (Елово-Горское) до 2422 (Сундозеро) экз./м², а средняя биомасса – от 0,15 (Палье) до 9,50 (Шапшозеро) г/м².

Исследования, выполненные с целью оценки биоресурсного потенциала водоемов Республики Карелия, позволили получить современные сведения о фауне озер Маслозеро, Селецкое, Палье, Сундозеро, Лососинское и Лижозеро, а по ряду водоемов – Елово-Горское (бассейн р. Кеми), Чинозеро, Хейзъярви, Кучозеро (бассейн ББК), Ройк-Наволоцкое, Суккозеро (бассейн р. Суны), Машозеро (бассейн р. Лососинки), Каргиозеро, Вожъярви (бассейн рек Вуоксы–Лендерки) – впервые.

Полученные данные включены в новый справочник «Озера Карелии» [2013], предназначенный для широкого круга пользователей, в котором обобщены материалы о природе 226 водоемов республики.

Сведения, собранные за длительный период исследований, известные ранее и современные, внесены в организованную базу данных. Она содержит информацию по 760 озерам Карелии (в том числе по зоопланктону для 390, а по бентосу для 112), используется для оценки состояния озер и их биоресурсов. Наряду с морфометрическими, гидрологическими, гидрохимическими в нее включены и гидробиологические показатели (общие численность и биомасса зоопланктона и макрозообентоса, значение основных систематических групп в составе сообществ).

Список видов зоопланктона исследованных озер, 2008–2011 гг.

Таксон	Водоем
Класс Rotatoria	
Семейство Trichocercidae	
<i>Trichocerca</i> sp.	2, 16
Семейство Synchaetidae	
<i>Synchaeta</i> sp.	1, 7, 8, 10
<i>Polyarthra dolichoptera</i> Idelson, 1925	7
<i>P. major</i> Burckhardt, 1900	4
<i>Polyarthra</i> sp.	1, 8, 9, 15, 17
<i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof, 1891)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19
Семейство Aaplanchnidae	
<i>Aaplanchna herricki</i> Guerne, 1888	1
<i>A. priodonta</i> Gosse, 1850	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
Семейство Euchlanidae	
<i>Euchlanis dilatata</i> Ehrenberg, 1832	1, 8, 10, 12
<i>E. triquetra</i> Ehrenberg, 1838	18
Семейство Brachionidae	
<i>Keratella cochlearis</i> (Gosse, 1851)	1, 5, 7, 14, 15, 16, 18
<i>K. hiemalis</i> Carlin, 1943	7
<i>K. quadrata</i> (Müller, 1786)	7
<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott, 1879)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19
<i>Notholca caudate</i> Carlin, 1943	6, 7
<i>N. cinctura</i> Skorikov, 1914	7
Семейство Conochilidae	
<i>Conochilus hippocrepis</i> (Schrank, 1803)	8, 9, 10, 12, 13
<i>C. unicornis</i> Rousselet, 1892	6, 7, 13, 18, 19
<i>Conochilus</i> sp.	1
Семейство Filiniidae	
<i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg, 1834)	1
Веслоногие раки	
Семейство Centropagidae	
<i>Limnocalanus macrurus</i> Sars, 1863	3, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 18
Семейство Diaptomidae	
<i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars, 1863)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
Семейство Temoridae	
<i>Eurytemora lacustris</i> (Poppe, 1887)	6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 18
<i>Heteroscope appendiculata</i> Sars, 1863	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 19
Семейство Cyclopidae	
<i>Cyclops strenuus strenuus</i> Fischer, 1851	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
<i>Cyclops</i> sp.	1, 4
<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus, 1857)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
<i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars, 1863)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
<i>T. crassus</i> (Fischer, 1853)	9, 10
Ветвистоусые раки	
Семейство Sidae	
<i>Sida crystallina crystallina</i> (O. F. Müller, 1776)	5, 8, 18
<i>Limnosida frontosa</i> Sars, 1862	3, 4, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 19
<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievin, 1848)	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
Семейство Holopedidae	
<i>Holopedium gibberum</i> Zaddach, 1855	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 19
Семейство Daphniidae	
<i>Daphnia (Daphnia) longispina</i> O. F. Müller, 1785	1, 4, 6, 9, 11, 12, 14, 15, 16
<i>D. (Daphnia) cucullata</i> G. O. Sars, 1862	2, 3, 16
<i>D. (Daphnia) cristata</i> G. O. Sars, 1862	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19
<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> (O. F. Müller, 1785)	11
<i>C. pulchella</i> Sars, 1862	2, 4, 6, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19
Семейство Macrothricidae	
<i>Ophryoxus gracilis gracilis</i> Sars, 1862	18

Таксон	Водоем
Семейство Chydoridae	
<i>Alonella nana</i> (Baird, 1850)	8
<i>Chydorus sphaericus</i> (O. F. Müller, 1785)	2, 3, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 17
<i>Alona quadrangularis</i> (O. F. Müller, 1785)	11
<i>A. guttata</i> Sars, 1862	19
Семейство Bosminidae	
<i>Bosmina (Bosmina) longirostris</i> (O. F. Müller, 1785)	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 18, 19
<i>B. (Eubosmina) longispina</i> Leydig, 1860	1, 6, 7, 9, 10, 13
<i>B. (Eubosmina) coregoni</i> Baird, 1857	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12
= <i>B. obt. obtusirostris</i> Sars, 1862	1, 2, 3, 6, 9, 16, 18, 19
= <i>B. obt. lacustris</i> Sars, 1862	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
= <i>B. coregoni coregoni</i> (Baird, 1857)	9, 11, 12, 13, 18, 19
= <i>B. coregoni gibbera</i> (Schoedler, 1866)	15
Семейство Polyphemidae	
<i>Polyphemus pediculus</i> (Linne, 1778)	3, 5, 8, 9, 14, 18, 19
Семейство Cercopagidae	
<i>Bythotrephes longimanus</i> Leydig, 1860	1, 5, 6, 7, 10, 14, 18
Семейство Leptodoridae	
<i>Leptodora kindtii</i> (Focke, 1844)	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 19

Примечание. Здесь и в прил. 2: 1 – Тикшозеро, 2 – Елово-Горское, 3 – Чинозеро, 4 – Хейзъярви, 5 – Кучозеро, 6 – Селецкое, 7 – Маслозеро, 8 – Ройк-Наволоцкое, 9 – Суккозеро, 10 – Гимольское, 11 – Сундозеро, 12 – Палье, 13 – Сандал, 14 – Лижмозеро, 15 – Лососинское, 16 – Машозеро, 17 – Шапшозеро, 18 – Каргиозеро, 19 – Вожъярви.

Приложение 2

Список видов зообентоса исследованных озер

Таксон	Водоем
Класс Oligochaeta	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 19
Класс Hirudinea	
<i>Herpobdella octoculata</i> (Linne, 1758)	16
<i>Glossiphonia complanata</i> (Linne, 1758)	16
Класс Crustacea	
<i>Mysis relicta</i> Loven, 1868	1, 6, 7, 11, 13
<i>Monoporeia affinis</i> Lindström, 1855	1, 6, 7, 11, 13
<i>Pallasiola quadrispinosa</i> (Sars, 1867)	6, 7, 11
<i>Gammarus lacustris</i> Sars, 1863	7
Класс Insecta	
Отряд Trichoptera	1, 10, 15,
<i>Molanna</i> sp.	16
Отряд Coleoptera	1, 15
Отряд Ephemeroptera	5, 10, 15, 16
<i>Ephemera vulgata</i> Linne, 1758	1, 14
<i>Heptagenia</i> sp.	1, 6, 7, 12, 13, 14
Отряд Odonata	1, 10, 16
Отряд Diptera	
Семейство Chironomidae	
<i>Monodiamesa bathyphila</i> Kieffer, 1911	7, 11, 13
<i>Psectrocladius psilopterus</i> Kieffer, 1906	4, 7, 12, 18
<i>Cricotopus silvestris</i> (Fabricius, 1794)	1
<i>Trissocladius zalutschicola</i> (Lipina, 1939)	15, 16,
<i>T. potamophilus</i> (Tshernovskij, 1949)	6, 7, 11
<i>T. parataticus</i> (Tshernovskij, 1949)	6, 7, 13
<i>Heterotanytarsus apicalis</i> Kieffer, 1922	13
<i>Limnophyes karelicus</i> (Tshernovskij, 1949)	13
<i>Paratrachocladius triquetra</i> (Tshernovskij, 1949)	11
<i>Zavrelia pentatoma</i> Kieffer, 1913	13
<i>Tanytarsus</i> sp.	1, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17
<i>Cladotanytarsus</i> sp.	4, 9, 12, 15, 16

Таксон	Водоем
<i>Corynocera ambigua</i> Zetterstedt, 1838	13
<i>Cryptochironomus defectus</i> Kieffer	1
<i>Cryptocladopelma viridula</i> (Fabricius, 1805)	15
<i>Demicryptochironomus vulneratus</i> (Zett., 1860)	1, 11, 15
<i>Chironomus</i> sp.	4, 5, 13, 15, 16, 17
<i>Paracladopelma camptolabis</i> (Kieffer, 1913)	13
<i>Limnochironomus nervosus</i> (Staeger, 1839)	19
<i>Pagastiella orophila</i> (Edwards, 1929)	1, 14
<i>Pseudochironomus prasinatus</i> (Staeger, 1839)	17
<i>Polypedilum scalaenum</i> (Schrank, 1803)	15, 17
<i>P. bicrenatum</i> Kieffer, 1921	13
<i>Paralauterborniella nigrochalteralis</i> (Mall., 1941)	13
<i>Sergentia</i> gr. <i>longiventris</i> Kieffer, 1924	3
<i>Stictochironomus crassiforceps</i> (Kieffer, 1922)	18
<i>Procladius</i> sp.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
<i>Thienemannimyia</i> gr. <i>lentiginosa</i> (Fries, 1823)	13
Tanytopodinae gen. sp. sp.	1
Семейство Ceratopogonidae	1, 11, 15, 16, 17
Семейство Chaoboridae	
<i>Chaoborus crystallinus</i> (De Geer, 1776)	4, 13, 16, 18, 19
Класс Gastropoda	
<i>Planorbis planorbis</i> (Linne, 1758)	1, 16
<i>Valvata piscinalis</i> (O. F. Muller, 1774)	15, 16
<i>Valvata</i> sp.	1
<i>Lymnaea</i> sp.	1, 15, 16
Класс Bivalvia	1, 3, 4, 17, 18
<i>Euglesa subtruncata</i> (Malm, 1855)	15
<i>E. henslowana</i> (Sheppard, 1823)	15
<i>E. casertana</i> (Poli, 1791)	15
<i>Euglesa</i> sp.	7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16
<i>Anadonta</i> sp.	16

Литература

Александров Б. М., Александрова Т. Н. Оз. Сундозеро (Сунозеро) // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 292–297.

Александров Б. М., Гордеев О. Н., Заблоцкий А. А. Лимнологический очерк озера Лососинного // Уч. зап. Карельск. пед. ин-та. Биологич. науки. Петрозаводск, 1959. Т. VII. С. 41–65.

Александров Б. М., Смирнов А. Ф. Оз. Пальозеро (Палье) // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 290–292.

Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем. СПб.: Наука, 1996. 190 с.

Балушкина Е. В., Винберг Г. Г. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Л.: Наука, 1979. С. 58–79.

Беляева К. И., Покровский В. В. Крупная ряпушка озер Карелии как объект искусственного разведения

// Рыбное хозяйство Карелии. Петрозаводск, 1958. Вып. 7. С. 25–67.

Беляева К. И., Урбан В. В. Оз. Лижмозеро // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 318–328.

Герд С. В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии // Тр. Карело-Фин. отд. ВНИОРХ. Л.; Петрозаводск, 1946. Т. 2. С. 27–139.

Гордеев О. Н. Оз. Машезеро (водохранилище) // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 359–360.

Гордеева Л. Н. Зоопланктон оз. Сандал // Уч. зап. Карельск. пед. ин-та. Петрозаводск, 1961. Т. XI, вып. 2. С. 117–127.

Гордеева-Перцева Л. И. Донная фауна Сандальского водохранилища // Ученые записки Карельского педагогического института. 1961. Т. 11, вып. 2. С. 106–116.

Гордеева-Перцева Л. И., Гордеева Л. Н. Особенности распределения зоопланктона в озерах Карелии // Сырьевые ресурсы внутренних водоемов Северо-Запада. Тр. Карельск. отдел. ГосНИОРХ. Петрозаводск, 1968. Т. V, вып. 1. С. 140–148.

Гордеева-Перцева Л. И., Гордеева Л. Н., Гуляева А. М., Стефановская А. Ф. Оз. Сандал

(водохранилище) // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 302–312.

Гуляева А. М. Рыбохозяйственное освоение Сандальского водохранилища // Рыбное хозяйство Карелии. Петрозаводск, 1958. Вып. 7. С. 143–159.

Каталог озер и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

Киселев И. Л. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука, 1969. Т. 1. С. 140–416.

Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Клюкина Е. А. Геоботаническая характеристика озер верхнего течения р. Суны // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1975. С. 67–78.

Куликова Т. П. Рекомендации по определению сапробности с учетом биологических особенностей планктонных организмов Карелии. Петрозаводск: Карельск. филиал АН СССР, 1983. 7 с.

Куликова Т. П. Видовой состав зоопланктона внутренних водоемов Карелии // Тр. КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2001. Вып. 2. С. 133–151.

Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 224 с.

Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Белого моря. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 325 с.

Куликова Т. П. Изученность зоопланктона водных объектов Республики Карелия // Тр. КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2013. № 6. С. 63–75.

Кутикова Л. А. Коловратки водоемов Карелии // Фауна озер Карелии. Беспозвоночные. М.; Л.: Наука, 1965. С. 52–70.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: автореф. дис. ... докт. химич. наук. М., 2006. 59 с.

Макрушин А. В. Биологический анализ качества вод. Л.: ЗИН АН СССР, 1974. 60 с.

Озера Карелии. Природа, рыбы и рыбное хозяйство. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. 619 с.

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Ленинград: Госметеиздат, 1977. 511 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных стран. Высшие насекомые. Двукрылые. СПб., 1999. Т. 4. 998 с.

Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Chironominae фауны СССР. Ленинград: Наука, 1983. 296 с.

Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Othocladiinae фауны СССР. Ленинград: Наука, 1970. 344 с.

Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Podonominae и Tanypodinae фауны СССР. Ленинград: Наука, 1977. 154 с.

Оценка состояния гидробиоценозов и возможные причины гибели рыбы в озере Шапшозеро. Научный отчет / Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. Петрозаводск, 1996. 6 с.

Потапова О. И. Оз. Тикшезеро // Озера Карелии. Природа, рыбы и рыбное хозяйство. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 587–592.

Соколова В. А. Оз. Гимольское // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 281–284.

Урбан В. В. Характеристика зоопланктона карельских озер и значение его в питании рыб // Тр. VII науч. конф. по изуч. внутр. водоемов Прибалтики. М.; Л. 1962. С. 144–150.

Филимонова З. И. Низшие ракообразные планктона озер Карелии // Фауна озер Карелии. Беспозвоночные. М.; Л.: Наука, 1965. С. 111–146.

Филимонова З. И. Зоопланктон некоторых озер Прионежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Карельск. филиал АН СССР, 1969. С. 293–304.

Поступила в редакцию 01.12.2014

References

Aleksandrov B. M., Aleksandrova T. N. Oz. Sundozero (Sunozero) [Lake Sundozero (Sunozero)]. *Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 292–297.

Aleksandrov B. M., Gordeev O. N., Zabolotskii A. A. Limnologicheskii ocherk ozera Lososinnogo [Lake Lososinnoe: a limnological outline]. *Uch. zap. Karel'sk. ped. in-ta. Biologich. nauki [Proc. Kar. Pedagog. Inst. Biol. Sci.]*. Petrozavodsk, 1959. Vol. VII. P. 41–65.

Aleksandrov B. M., Smirnov A. F. Oz. Pal'ozero (Pal'e) [Lake Pal'ozero (Pal'e)]. *Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 290–292.

Andronikova I. N. Strukturno-funktsional'naya organizatsiya zooplanktona ozernykh ekosistem [Structural-functional organization of zooplankton in lake ecosystems]. St. Petersburg: Nauka, 1996. 190 p.

Balushkina E. V., Vinberg G. G. Zavisimost' mezhdru dlinoi i massoi tela planktonnykh rakoobraznykh [Relationship between body length and weight in planktonic crustacea]. *Eksperimental'nye i polevye issledovaniya biologicheskikh osnov produktivnosti ozer [Experimental and field studies of biological bases of lake productivity]*. Leningrad: Nauka, 1979. P. 58–79.

Belyaeva K. I., Pokrovskii V. V. Krupnaya ryapushka ozer Karelii kak ob'ekt iskusstvennogo razvedeniya [Large vendace in Karelian lakes: artificial breeding].

Rybnoe khozyaistvo Karelii [Fishery in Karelia]. Petrozavodsk, 1958. Iss. 7. P. 25–67.

Belyaeva K. I., Urban V. V. Oz. Lzhmzero [Lake Lzhmzero]. *Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 318–328.

Filimonova Z. I. Nizshie rakoobraznye planktona ozer Karelii [Planktonic crustaceans of Karelian lakes]. *Fauna ozer Karelii. Bespozvonochnye [Fauna of Karelian lakes. Invertebrates]*. Moscow; Leningrad: Nauka, 1965. P. 111–146.

Filimonova Z. I. Zooplankton nekotorykh ozer Prionezh'ya [Zooplankton in some lakes of Prionezhje]. *Voprosy gidrologii, ozerovedeniya i vodnogo khozyaistva Karelii [Issues of hydrology, limnology and water management in Karelia]*. Petrozavodsk: Karel'sk. filial AN SSSR, 1969. P. 293–304.

Gerd S. V. Obzor gidrobiologicheskikh issledovaniy ozer Karelii [Review of hydrobiological studies of Karelian lakes]. *Tr. Karelo-Fin. otd. VNIORKh [Proc. Kar.-Fin. Dep. VNIORKh]*. Leningrad; Petrozavodsk, 1946. Vol. 2. P. 27–139.

Gordeev O. N. Oz. Mashezero (vodokhranilishche) [Lake Mashezero (reservoir)]. *Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 359–360.

Gordeeva L. N. Zooplankton oz. Sandal [Zooplankton in Lake Sandal]. *Uchen. zap. Karel'sk. ped. in-ta [Proc. Kar. Pedagog. Inst.]*. Petrozavodsk, 1961. Vol. XI, iss. 2. P. 117–127.

Gordeeva-Pertseva L. I. Donnaya fauna Sandal'skogo vodokhranilishcha [Benthic fauna of the Sandal Reservoir]. *Uchenye zapiski Karel'skogo pedagogicheskogo instituta [Proc. Kar. Pedagog. Inst.]*. 1961. Vol. 11, iss. 2. P. 106–116.

Gordeeva-Pertseva L. I., Gordeeva L. N. Osobennosti raspredeleniya zooplanktona v ozerakh Karelii [Features of zooplankton distribution in Karelian lakes]. *Syr'evye resursy vnutrennikh vodoemov Severo-Zapada. Tr. Karel'sk. otdel. GosNIORKh [Raw resources of inland water bodies of the North-West. Proc. Kar. Br. GosNIORKh]*. Petrozavodsk, 1968. Vol. V, iss. 1. P. 140–148.

Gordeeva-Pertseva L. I., Gordeeva L. N., Gulyaeva A. M., Stefanovskaya A. F. Oz. Sandal (vodokhranilishche) [Lake Sandal (reservoir)]. *Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 302–312.

Gulyaeva A. M. Rybokhozyaistvennoe osvoenie Sandal'skogo vodokhranilishcha [Fishery development of the Sandal Reservoir]. *Rybnoe khozyaistvo Karelii [Fishery in Karelia]*. Petrozavodsk, 1958. Iss. 7. P. 143–159.

Katalog ozer i rek Karelii [Catalogue of lakes and rivers of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2001. 290 p.

Kiselev I. L. Plankton morei i kontinental'nykh vodoemov [Plankton in the seas and inland water bodies]. Leningrad: Nauka, 1969. Vol. 1. P. 140–416.

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

Kitaev S. P. Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtologov [Fundamentals of limnology for

hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. 395 p.

Klyukina E. A. Geobotanicheskaya kharakteristika ozer verkhnego techeniya r. Suny [Geobotanical characteristics of lakes on the Suna River upstream]. *Vodnye resursy Karelii i ikh ispol'zovanie [Water resources of Karelia and their use]*. Petrozavodsk, 1975. P. 67–78.

Kulikova T. P. Rekomendatsii po opredeleniyu saprobnosti s uchetom biologicheskikh osobennostei planktonnykh organizmov Karelii [Guidelines for saprobity assessment based on the biological features of planktonic organisms of Karelia]. Petrozavodsk: Karel'sk. filial AN SSSR, 1983. 7 p.

Kulikova T. P. Vidovoi sostav zooplanktona vnutrennikh vodoemov Karelii [Species composition of zooplankton in inland water bodies of Karelia]. *Tr. KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]*. Petrozavodsk, 2001. Iss. 2. P. 133–151.

Kulikova T. P. Zooplankton vodnykh ob'ektov basseina Onezhskogo ozera [Zooplankton in water bodies of Onega Lake basin]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. 224 p.

Kulikova T. P. Zooplankton vodnykh ob'ektov basseina Belogo moraya [Zooplankton in water bodies of the White Sea basin]. Petrozavodsk: KarRC of RAN, 2010. 325 p.

Kulikova T. P. Izuchennost' zooplanktona vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya [The state of knowledge on zooplankton in water bodies of the Republic of Karelia]. *Tr. Karel'sk. nauch. tsentra RAN [Trans. KarRC RAS]*. Petrozavodsk, 2013. No 6. P. 63–75.

Kutikova L. A. Kolovratki vodoemov Karelii [Rotifers in water bodies of Karelia]. *Fauna ozer Karelii. Bespozvonochnye [Fauna of Karelian lakes. Invertebrates]*. Moscow; Leningrad: Nauka, 1965. P. 52–70.

Lozovik P. A. Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoychivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrogeochemical criteria of the state of surface waters in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: avtoref. dis. ... dokt. khimich. nauk [PhD Diss. (Chem.)]. Moscow, 2006. 59 p.

Makrushin A. V. Biologicheskii analiz kachestva vod [Biological analysis of water quality]. Leningrad: ZIN AN SSSR, 1974. 60 p.

Ozera Karelii. Priroda, ryby i rybnoe khozyaistvo. Spravochnik [Lakes of Karelia. Nature, fish and fishery. Reference book]. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. 619 p.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]. Eds. N. N. Filatova, V. I. Kukhareva. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. 464 p.

Opredelitel' presnovodnykh bespozvonochnykh Evropeiskoi chasti SSSR [Key to the freshwater invertebrates of the European part of the USSR]. Leningrad: Gosmeteoizdat, 1977. 511 p.

Opredelitel' presnovodnykh bespozvonochnykh Rossii i sopedel'nykh stran [Key to the freshwater invertebrates of Russia and adjacent countries]. Vysshie nasekomye. Dvukrylye [The higher insects. Diptera]. St. Petersburg, 1999. Vol. 4. 998 p.

Otsenka sostoyaniya gidrobiotsenozov i vozmozhnyye prichiny gibeli ryby v ozere Shapshozero [Assessment

of hydrobiocenoses and possible causes of fish kill in Lake Shapshozero]. *Nauchnyi otchet. Institut vodnykh problem Severa KarNTs RAN [Scientific report. Northern Water Problems Inst., KarRC RAS]*. Petrozavodsk, 1996. 6 p.

Pankratova V. Ya. Lichinki i kukolki komarov podsemeistva Chironominae fauny SSSR [Larvae and pupae of mosquitos of the subfamily Chironominae of the USSR fauna]. Leningrad: Nauka, 1983. 296 p.

Pankratova V. Ya. Lichinki i kukolki komarov podsemeistva Othocladiinae fauny SSSR [Larvae and pupae of mosquitos of the subfamily Othocladiinae of the USSR fauna]. Leningrad: Nauka, 1970. 344 p.

Pankratova V. Ya. Lichinki i kukolki komarov podsemeistva Podonominae i Tanypodinae fauny SSSR [Larvae and pupae of mosquitos of the subfamily Podonominae and Tanypodinae of the USSR fauna]. Leningrad: Nauka, 1977. 154 p.

Potapova O. I. Oz. Tikshezero [Lake Tikshezero]. *Ozera Karelii. Priroda, ryby i rybnoe khozyaistvo. Spravochnik [Lakes of Karelia. Nature, fish and fishery. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 587–592.

Sokolova V. A. Oz. Gimol'skoe [Lake Gimol'skoe]. *Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]*. Petrozavodsk: Gos. izd-vo Karel'skoi ASSR, 1959. P. 281–284.

Urban V. V. Kharakteristika zooplanktona karel'skikh ozer i znachenie ego v pitanii ryb [Characteristics of zooplankton in Karelian lakes and its role in the nutrition of fish]. *Tr. VII nauch. konf. po izuch. vnutr. vodoemov Pribaltiki [Proc. 4th sci. conf. for the study of inland water bodies in the Baltic countries]*. Moscow; Leningrad, 1962. P. 144–150.

Received December 01, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Куликова Тамара Павловна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: tampk@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Рябинкин Александр Валентинович

главный биолог, к. б. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: sorbus08@mail.ru
тел.: (8142) 57652

CONTRIBUTORS:

Kulikova, Tamara

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrosavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: tampk@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Ryabinkin Alexandr

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrosavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: sorbus08@mail.ru
tel.: (8142) 57652

УДК 556.115:556.524:504.61 (282.247.211)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДЫ ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПО МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ И ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Е. В. Теканова, Е. М. Макарова, Н. М. Калинкина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Показаны количественное развитие и пространственная динамика важнейших эколого-трофических групп гетеротрофного бактериопланктона в р. Лососинке и Неглинке г. Петрозаводска (олигокарбофилы, сапрофиты, фенолрезистентные, углеводородокисляющие и общие колиформные бактерии). Рассмотрено влияние гидрометеорологического фактора на изученные группы бактериопланктона. По уровню развития индикаторных групп гетеротрофных бактерий выявлено загрязнение воды легкоминерализуемым органическим веществом, в том числе фекального происхождения, и нефтяными углеводородами. Установлено, что речная вода относилась к β -, α -мезосапробному классу вод с признаками загрязнения и эвтрофирования. Обилие потенциально патогенной микрофлоры в воде изучаемых рек на урбанизированной территории исключало возможность их рекреационного использования. Биотестирование показало, что вода городских рек не оказывала токсического воздействия на стандартные тест-объекты – ракообразных *Ceriodaphnia affinis*.

Ключевые слова: малые реки; загрязнение воды; бактериопланктон; эколого-трофические группы; биоиндикация; санитарное состояние; биотестирование; рекреация.

E. V. Tekanova, E. V. Makarova, N. M. Kalinkina. AN ASSESSMENT OF THE CONDITION OF THE WATER OF LAKE ONEGO INFLOWING STREAMS UNDER HUMAN IMPACT INFLUENCE USING MICROBIOLOGICAL AND TOXICOLOGICAL PARAMETERS

The quantitative growth and spatial dynamics of major ecotrophic groups of heterotrophic bacterioplankton in rivers Lososinka and Neglinka in Petrozavodsk (oligocarbophilic, saprophytic, phenol-resistant, hydrocarbon oxidizing, and total coliform) are shown. The effect of the hydrometeorological factor on the investigated groups of bacterioplankton was considered. Water pollution by labile organic matter, including fecal organic matter and oil products was indicated by the level of development of indicator groups of heterotrophic bacteria. The river water was classified into the β -, α -mesosaprobic class with signs of pollution and eutrophication in the studied period. The abundance of potentially pathogenic microorganisms in the water of these urban rivers excluded the possibility of their recreational use. The bioassay showed that water in the urban rivers had no toxic effect on standard test objects – the crustacean *Ceriodaphnia affinis*.

Keywords: small rivers; water pollution; bacterioplankton; ecotrophic groups; bioindication; bioassay; organic matter; sanitary condition; recreation.

Городские водные объекты находятся под постоянным антропогенным воздействием, в результате чего экосистемы небольших рек и озер быстро деградируют. Водоёмы и водотоки перестают выполнять рекреационную функцию, могут стать причиной ухудшения качества воды своих водоприемников – крупных озер и рек. Проблема масштабного загрязнения малых рек России стала темой Парламентских слушаний в Федеральном Собрании РФ в 2003 г. Среди мер по решению экологических проблем малых рек была названа оптимизация мониторинга их состояния на основе сочетания гидрохимических, гидробиологических и токсикологических наблюдений [Рекомендации..., 2004].

Важными составляющими биомониторинга водных экосистем являются биоиндикация и биотестирование. Индикаторная значимость бактериального звена и его ведущая роль в самоочищении воды определяется разнообразием способов функционирования бактерий и существованием разных эколого-трофических групп, способных к специфической (облигатной или факультативной) утилизации веществ различного, в том числе антропогенного, происхождения, недоступных другим организмам. Кроме того, высокая скорость метаболизма и короткое время генерации микроорганизмов дают им возможность гораздо быстрее, чем другим компонентам биоты, реагировать на меняющиеся условия среды. Биотестирование воды представляет собой экспрессный метод выявления опасной ситуации, связанной с поступлением в водотоки токсичных веществ, который позволяет дать интегральную характеристику совокупного действия токсикантов на биоту [Калинкина и др., 2013].

Подробная биоиндикация антропогенно нарушенных экосистем малых и средних водотоков России по микробиологическим показателям проведена в Поволжье [Бухарин и др., 2007; Романенко, 2007, и др.] и на Дальнем Востоке [Гаретова, 2008, и др.]. На реках урбанизированных территорий Карелии Лососинке и Неглинке микробиологические исследования выполнены в 2001 и 2002 гг. [Тимакова, 2010]. Природные поверхностные воды Карелии отличаются большим содержанием гумусовых веществ, низкой минерализацией, слабокислой реакцией среды, низкими температурами. Природные особенности химического состава поверхностных вод, наряду с антропогенным загрязнением, оказывают влияние на развитие бактериопланктона. В связи с этим продолжение микробиологических исследований на реках Карелии в условиях урбанизации представляется весьма

актуальным, в том числе для дальнейшего поиска подходов к решению проблемы региональной классификации состояния воды по микробиологическим показателям.

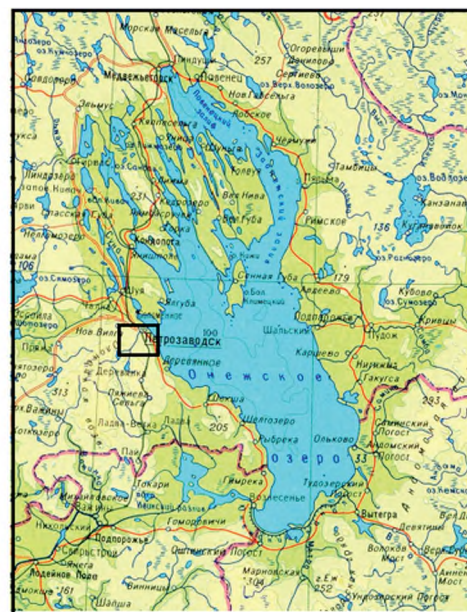
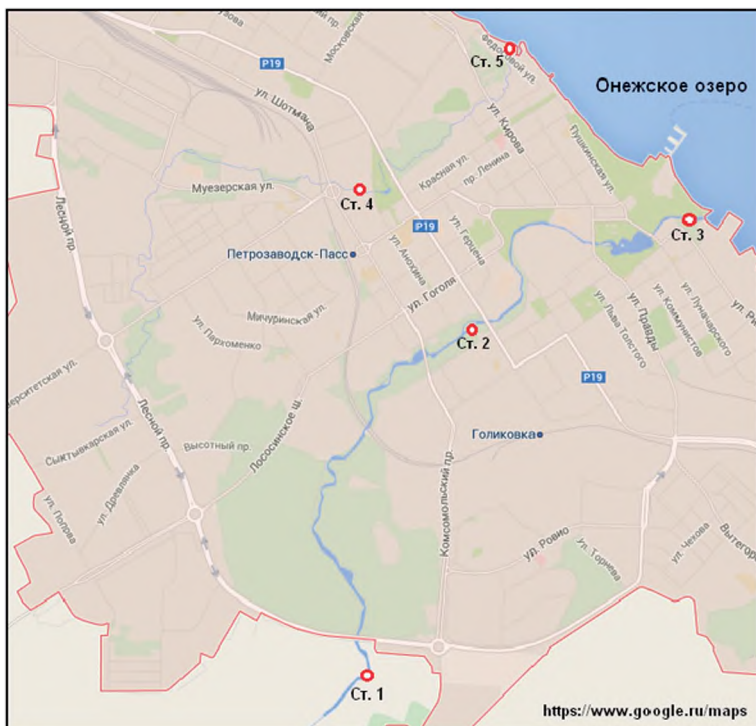
Целью настоящей работы была оценка состояния воды рек г. Петрозаводска по микробиологическим и токсикологическим показателям. Для выполнения работы решались следующие задачи: 1) определить количественный уровень важнейших эколого-трофических групп бактериопланктона; 2) по показателю сапробности, индексу трофии и загрязненности оценить эколого-санитарное состояние речной воды; 3) по санитарно-бактериологическим показателям выявить возможность рекреационного использования рек; 4) выполнить биотестирование образцов воды с использованием стандартного тест-объекта.

Материал и методы исследования

Исследования проводились на реках г. Петрозаводска Лососинке и Неглинке, расположенных в среднетаежной подзоне Карелии и принадлежащих к водосборному бассейну Онежского озера. Оба водотока относятся к категории малых рек. Река Лососинка (длина 25 км, глубина 0,4–3,0 м) берет начало из озера Лососинное, в черте Петрозаводска протекает 12 % ее русла. Река Неглинка (длина 14 км, глубина 0,2–1,0 м) истекает из болотистой ламбы на окраине города, около 50 % ее русла расположено на городской территории [Каталог..., 2001; Карпечко, 2013].

Воды Лососинки и Неглинки характеризуются высоким содержанием органического вещества гумусной природы и относятся к мезополигумусному классу. На загрязнение воды указывает повышенное содержание легкоминерализуемого органического вещества, биогенных веществ, нефтепродуктов [Сабылина, 1999; Рыжков, Горохов и др., 2012]. Река Неглинка отличается высокой минерализацией воды вследствие большой доли подземного стока в питании реки [Бородулина, 2013].

Отбор проб воды проводился в летний период (июнь–август) 2011–2012 гг. в условно фоновом участке р. Лососинки за городской чертой, в районе «Агробазы» (ст. 1) и на двух участках в условиях урбанизации в Центральном районе города – около гимназии № 37 (ст. 2) и в приустьевой части реки за туркомплексом «Карелия» (ст. 3). На р. Неглинке пробы отбирались только на урбанизированной территории в Центральном районе Петрозаводска – ниже железнодорожного депо (ст. 4) и в приустьевой части реки на ул. Федосовой (ст. 5) (рис.).



Карта района исследований и расположение точек отбора проб на реках Лососинке и Неглинке (<https://www.google.ru/maps/place>). Дата обращения: 02.12.1014)

В воде определялись следующие эколого-трофические группы гетеротрофного бактериопланктона: 1) олигокарбофильные бактерии (ОКБ); 2) сапрофитные бактерии (СБ); 3) углеводородокисляющие бактерии (УОБ); 4) фенолрезистентные бактерии (ФРБ); 5) общие колиформные бактерии, или бактерии группы кишечной палочки (БГКП).

Для количественной оценки изучаемых групп бактериопланктона применялся метод глубинного посева на агаризованную среду. При этом СБ высевались на рыбо-пептонный агар (РПА), ОКБ – на среду РПА (в разведении РПА: 10), ФРБ – на среду РПА с добавлением фенола [Кузнецов, Дубинина, 1989]. УОБ учитывались на среде Диановой–Ворошиловой с добавлением очищенного агара Дифко. Перед посевом в среду добавлялась солярка, в качестве эмульгатора солярки использовался ТВИН-80 [Унифицированные методы..., 1985; Руководство..., 1992]. Длительность инкубации составляла 3–10 суток при $t = 20-22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные данные выражались в количестве колониобразующих единиц (КОЕ).

БГКП определялись методом мембранной фильтрации через фильтры Millipore с диаметром пор 0,45 мкм [Методические указания..., 1981]. Колонии выращивались на агаризованной среде Эндо при $t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 час с последующим выполнением отрицательного

цитохромоксидазного теста. Результаты теста выражались в Coli-ind.

Эколого-санитарное состояние рек (сапробность, загрязненность, индекс трофии) оценивалось по количеству сапрофитных, олигокарбофильных, фенолрезистентных и углеводородокисляющих бактерий [Оксиук и др., 1993; Руководство..., 1992], санитарно-бактериологическое – по величине Coli-ind в соответствии с действующими санитарными правилами и нормами Минздрава России [Гигиенические требования..., 2000].

Для биотестирования образцы речной воды отбирались в июле 2010 г. на р. Лососинке (3 станции) и в июне 2012 г. на р. Неглинке (19 станций). Станции отбора проб располагались на городских участках изучаемых рек. В экспериментах использовался стандартный тест-объект ветвистоусые рачки *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg (Crustacea, Cladocera) [Жмур, 2001]. Культура *C. affinis* была предоставлена старшим научным сотрудником Института биологии внутренних вод РАН И. В. Чаловой. В сосуды наливали по 100 мл пробы воды и помещали по 5 экз. рачков. Продолжительность опыта составляла 7 сут., повторность выполнения – 2-кратная. Контролем служила грунтовая вода, на которой выращивалась культура цериодафний. Всего в опытах было использовано 200 экз. рачков.

Результаты и обсуждение

В период исследований численность изученных эколого-трофических групп бактерий в воде р. Лососинки на территории города существенно варьировала, достигая высоких значений (табл. 1). Количество ОКБ обнаруживалось в пределах от 2,9 до 16,6 тыс. КОЕ/мл, СБ – от 1,0 до 12,9 тыс. КОЕ/мл, УОБ – от 0,05 до 1,29 тыс. КОЕ/мл, ФРБ – от 0,03 до 3,11 тыс. КОЕ/мл, БГКП – от 4,1 до 188,2 тыс. кл./л.

Летние периоды 2011 и 2012 годов различались по гидрометеорологическим условиям. Суммарное количество осадков в 2011 г. на территории г. Петрозаводска (211,8 мм) соответствовало климатической норме за этот период (212 мм), в 2012 г. – существенно превышало ее (274,1 мм). Средняя за летние месяцы температура воздуха в 2011 г. была на 1,5 °С выше, чем в 2012 г. Оценить влияние погодных условий на развитие бактериопланктона р. Лососинки в привязке к точке исследования оказалось затруднительно, так как наряду с гидрометеорологическим мощное влияние на экосистему реки оказывает антропогенный фактор, и загрязнение различного рода органическим веществом служит дополнительным субстратом для бактерий. Количество бактерий одних групп (СБ, ОКБ) оказалось в 1,2–2 раза выше сухим и теплым летом 2011 г., других (ФРБ, БГКП) – в 1,3–9 раз выше дождливым летом 2012 г.

Более отчетливо погодные особенности лета отражались в пространственной динамике бактериопланктона р. Лососинки. Обогащение воды терригенным органическим веществом в черте города оба года проявлялось в последовательном увеличении количественных показателей всех изученных групп бактерий от условно фонового участка к устью (см. табл. 1). Однако более выражен этот градиент был сухим и теплым летом 2011 г. Так, разница в количестве ОКБ между условно фоновым участком и участком в районе гимназии № 37 достигала 3 раз, между фоновым и приустьевым участками – 5 раз, а в 2012 г. – 1,3 и 2 раз соответственно. Для СБ эта разница в 2011 г. достигала 5 и 9 раз, в 2012 г. – 1,6 и 2,3 раза соответственно; для ФРБ в 2011 г. – 2 и 4 раз, в 2012 – 2 и 1,7 раза соответственно; для УОБ в 2012 г. – 1,8 и 4 раз соответственно. Наибольший градиент численности был обнаружен летом 2011 г. в развитии БГКП, когда Coli-ind в речном участке у гимназии № 37 оказался в 38 раз больше, чем в условно фоновом районе, а в приустьевом участке был в 62 раза выше

фонового против 4 и 5 раз соответственно летом 2012 г.

Увеличение численности гетеротрофного бактериопланктона в нижнем течении р. Лососинки (см. табл. 1) может выступать косвенным показателем неполной деструкции, незавершенности трансформации поступающего в водоток терригенного органического вещества, в том числе антропогенного происхождения.

В р. Неглинке количество бактерий изученных эколого-трофических групп в исследованный период было выше по сравнению с р. Лососинкой (табл. 2). Численность ОКБ в городской черте достигала 2,2–23,8 тыс. КОЕ/мл, СБ – 2,0–15,7 тыс. КОЕ/мл, ФРБ – 1,1–12,5 тыс. КОЕ/мл, УОБ (2012 г.) – 0,2–1,8 тыс. КОЕ/мл, БГКП – 165,5–440,0 тыс. кл./л. В каждом из двух мест отбора проб отчетливо наблюдались более высокие показатели численности бактериопланктона (в 1,5–4 раза) в дождливом 2012 г. по сравнению с 2011 г. То же самое отмечалось и при сравнении рек Лососинки и Неглинки по средним в черте города показателям обсемененности воды бактериями соответствующих групп в 2011 и 2012 гг. Вероятно, что из-за меньших размеров р. Неглинки атмосферные осадки и терригенный сток оказывают более сильное влияние на состояние бактериопланктона, и поэтому после сильных дождей в его составе преобладает аллохтонная и бентосная бактериофлора.

Отсутствие фонового участка затрудняло однозначную оценку тренда в динамике численности изученных групп бактериопланктона по направлению к устью р. Неглинки, хотя на этом участке отмечалось некоторое снижение их количества по мере приближения к району у железнодорожного депо (см. табл. 2).

Полученные данные о состоянии гетеротрофного бактериопланктона рек Лососинки и Неглинки позволили оценить эколого-санитарное и санитарно-бактериологическое состояние их воды в период исследований (табл. 3). Уровень развития СБ, индикаторов активности процесса самоочищения воды в городской части рек Лососинки и Неглинки указывал на β-, α-мезосапробный характер вод, в условно фоновой части р. Лососинки класс сапробности снижался до олиго-, β-мезосапробного. Индекс трофии (или загрязненности) вод, рассчитанный по соотношению ОКБ и СБ, находился в пределах от 2 до 3, что свидетельствовало об эвтрофировании и (или) загрязнении всех изученных участков рек. Небольшое повышение индекса трофии (или загрязненности) отмечалось в условно фоновом участке р. Лососинки и в приустьевом

Таблица 1. Численность эколого-трофических групп гетеротрофных бактерий в воде р. Лососинки

Год	Район города	Исследуемый участок	СБ	ОКБ	ФРБ	УОБ	БГКП, Coli-ind
			тыс. КОЕ/мл				
2011	За пределами города	Условно фоновый, «Агробаза»	<u>0.53–0.73*</u> 0,56	<u>0.69–2.15</u> 1,69	<u>0.00–1.08</u> 0,22	–**	<u>1415–4146</u> 2781
	Центральный	Около гимназии № 37	<u>1.02–5.43</u> 2,95	<u>3.08–8.41</u> 5,48	<u>0.03–2.46</u> 0,44	–	<u>75603–136282</u> 105943
	Центральный	Приустьевый, около туркомплекса «Карелия»	<u>2.30–12.95</u> 5,28	<u>4.00–16.58</u> 9,22	<u>0.06–2.86</u> 0,90	–	<u>156757–188288</u> 172522
2012	За пределами города	Условно фоновый, «Агробаза»	<u>0.86–3.80</u> 1,22	<u>2.90–6.14</u> 3,53	<u>0.07–3.70</u> 0,69	<u>0.05–0.63</u> 0,19	<u>3097–4290</u> 3693
	Центральный	Около гимназии № 37	<u>1.21–6.80</u> 1,99	<u>2.84–7.69</u> 4,71	<u>0.56–3.11</u> 1,40	<u>0.14–0.92</u> 0,34	<u>4098–28182</u> 13602
	Центральный	Приустьевый, около туркомплекса «Карелия»	<u>2.18–3.70</u> 2,80	<u>4.02–9.38</u> 6,91	<u>0.33–3.06</u> 1,19	<u>0.15–1.29</u> 0,77	<u>7377–162229</u> 18778

Примечание. Здесь и в табл. 2: * над чертой – min–max, под чертой – среднее значение; ** исследования не проводились.

Таблица 2. Численность эколого-трофических групп гетеротрофных бактерий в воде р. Неглинка

Год	Район города	Исследуемый участок	СБ	ОКБ	ФРБ	УОБ	БГКП (Coli-ind)
			тыс. КОЕ/мл				
2011	Центральный	Ниже ж/д депо	<u>1.99–5.25*</u> 3,27	<u>3.03–13.47</u> 8,82	<u>3.18–12.52</u> 3,53	–	<u>250909–278378</u> 264643
		Приустьевый, ул. Федосовой	<u>1.97–3.07</u> 2,03	<u>8.01–8.75</u> 8,07	<u>1.09–10.71</u> 1,86	–	<u>173874–176577</u> 175225
2012	Центральный	Ниже ж/д депо	<u>5.87–15.75</u> 9,36	<u>10.13–23.83</u> 15,40	<u>1.73–10.70</u> 5,88	<u>0.24–1.76</u> 0,86	–
		Приустьевый, ул. Федосовой	<u>2.70–13.20</u> 6,92	<u>2.20–21.00</u> 9,72	<u>2.04–11.23</u> 6,92	<u>0.16–1.32</u> 0,75	<u>165545–440000</u> 302272

Таблица 3. Эколого-санитарное состояние воды рек Лососинки и Неглинки по микробиологическим показателям

Река	Исследуемый участок	Индекс трофии (загрязненности)	Сапробность	Загрязнение нефтяными углеводородами (2012 г.)	Рекреационное использование
Лососинка	Условно фоновый, «Агробаза»	3,0	олиго-, β-Мезосапробная	нет	да
	Около гимназии № 37	2,1	β-Мезосапробная	нет	нет
	Приустьевый, около туркомплекса «Карелия»	2,4	β-, α-Мезосапробная	есть	нет
Неглинка	Ниже ж/д депо	2,0	β-, α-Мезосапробная	есть	нет
	Приустьевый, ул. Федосовой	3,0	β-, α-Мезосапробная	есть	нет

участке р. Неглинки и отражало некоторое снижение уровня трофии и (или) меньшую степень загрязнения воды в этих частях рек. Индикатором загрязнения воды р. Неглинки и приустьевой части р. Лососинки нефтяными углеводородами были численности УОБ, утилизирующих эти соединения, более 1000 КОЕ/мл [Руководство..., 1992]. Аналогичный количественный критерий (1000 КОЕ/мл) существует и для индикации фенольного загрязнения воды ФРБ, способными к росту в присутствии фенола. Превышение численности ФРБ отмечалось в обеих реках, в том числе и в условно чистом районе р. Лососинки. Учитывая особенности химического состава воды [Сабылина, 1999; Рыжков, Горохов и др., 2012], обогащение воды фенольными соединениями, помимо их антропогенного поступления с городской территории, может быть связано с высоким природным содержанием гумусовых веществ в реках. Тем не менее в 4–5 раз более высокие численности ФРБ в р. Неглинке по сравнению с р. Лососинкой, возможно, определяются ее большей загрязненностью фенолами и их производными антропогенного происхождения.

Обсемененность городской части рек БГКП часто значительно превышала действующие нормы СанПиН для водных объектов рекреационного использования и свидетельствовала о наличии фекального загрязнения, что делало оба водотока непригодными для отдыха горожан летом 2011 и 2012 гг. Наибольшим содержанием потенциально патогенной микрофлоры характеризовалась вода р. Неглинки. При этом в условно фоновом участке р. Лососинки численность БГКП не превышала установленные нормативы.

Биотестирование р. Лососинки в июне 2010 г. показало, что образцы воды, отобранные в среднем течении и в устье реки, не проявили токсического действия на вид *C. affinis*.

Токсикологические исследования на р. Неглинке показали, что ни один образец воды в черте города не обладал токсическим действием. Выживаемость *C. affinis* к концу 7-дневного эксперимента во всех вариантах опыта была стопроцентной. Сходные результаты были получены при биотестировании воды устьевое участка р. Неглинки в 1992–2003 гг. с использованием ветвистоусого рачка *Daphnia magna* Straus [Рыжков, Артемьева, 2004], когда было показано, что в 95 % исследованных проб выживаемость дафний в опытах была абсолютной (100 %). В то же время вода на участке реки, расположенном в верхнем течении, за пределами г. Петрозаводска, в 60 % проб была летальной для этих животных [Рыжков,

Артемьева, 2004]. Наблюдаемое различие в токсичности объясняется низкими значениями рН воды (до 4,5) в верхнем течении р. Неглинки, что и определяло негативное действие речных вод на дафний. В то же время в нижнем течении величина рН возрастала. Кроме того, в устье реки увеличивается количество взвешенного органического вещества антропогенного происхождения, которое способствует детоксикации тяжелых металлов [Рыжков, Артемьева, 2004].

Заключение

Таким образом, анализ полученных данных и сравнение их с результатами исследований бактериопланктона городских рек, предпринятых в 2002 и 2003 гг. [Тимакова, 2010], показали, что за 10-летний период изменения эколого-санитарного состояния воды по микробиологическим показателям не произошло. Так, определенная нами сапробность воды рек Лососинки и Неглинки в черте города совпала с оценкой 2002 и 2003 гг.; вполне согласуется и уровень количественного развития ФРБ и УОБ. В то же время санитарно-бактериологическое состояние рек Лососинки и Неглинки летом 2011 и 2012 гг. было значительно хуже. Лишь в условно фоновом участке р. Лососинки и в 2002–2003, и в 2011–2012 гг. обсемененность воды потенциально патогенной микрофлорой не превышала нормативы для водоемов рекреационного использования.

Анализ результатов токсикологических исследований, включая литературные данные, свидетельствует об отсутствии токсических свойств воды городских участков рек Лососинки и Неглинки. Скорее всего, это объясняется высоким уровнем в речных водах гуминовых веществ, образующих комплексные соединения с тяжелыми металлами и токсикантами органического происхождения, что приводит к формированию в воде их нетоксичных форм. Токсиканты, связанные с органическим веществом, могут осаждаться на дне рек. Изучение этих процессов представляет актуальную тему будущих исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00766).

Литература

Бородулина Г. С. Подземные воды // Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред.

А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. С. 31–41.

Бухарин О. В., Немцева Н. В., Плотноков А. О., Яценко-Степанова Т. Н. Комплексный микробиологический анализ воды реки Чапаевка // Биоиндикация экологического состояния равнинных рек / Ред. О. В. Бухарин, Г. С. Розенберг. М.: Наука, 2007. С. 178–183.

Гаретова Л. А. Количественные оценки экологического состояния малых рек Хабаровского края // Пресноводные экосистемы бассейна реки Амур. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 111–122.

Гигиенические требования к охране поверхностных вод: Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.1.5.980–00). М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000.

Жмур Н. С. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодородности цериодафний. М.: АКВАРОС, 2001. 52 с.

Калинкина Н. М., Сидорова А. И., Гридина А. А. Биотестирование воды реки Лососинки с использованием двух видов ракообразных // Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 84–86.

Карпечко В. А. Гидрографическая и гидрологическая характеристика водотоков // Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 25–27.

Каталог озер и рек Карелии / Ред. Н. Н. Филатов, А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. 290 с.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 285 с.

Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу воды поверхностных водоемов / Мин-во здравоохранения СССР. М., 1981. 36 с.

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П. и др. Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал, 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.

Рекомендации Парламентских слушаний «Экология малых рек России: проблемы и пути их решения» // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: обзорная информация, 2004. № 8. С. 72–79.

Романенко А. В. Бактериопланктон // Экосистема малой реки в изменяющихся условиях среды / Ред. А. В. Крылов, А. А. Бобров. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2007. С. 101–110.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ред. В. А. Абакумов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

Рыжков Л. П., Артемьева Н. В. Изменение биологического качества воды реки Неглинки – притока Онежского озера под влиянием антропогенной нагрузки // Экосистемы малых рек: биоразнообразие, биология, охрана: тезисы докладов Всероссийской конференции. Борок, 2004. 75 с.

Рыжков Л. П., Горохов А. В., Марченко Л. П. Трансформация химического состава вод реки Лососинки под воздействием природных и антропогенных

факторов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2012. № 8, Т. 1. С. 20–24.

Сабылина А. В. Современный гидрохимический режим озера // Онежское озеро. Экологические проблемы / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 58–108.

Тимакова Т. М. Микробиологическая оценка состояния урбанизированных притоков Онежского озера // Социально-экономические аспекты

устойчивого развития человечества: материалы I Международной научно-практической конференции (Москва-Пенза, 13–14 мая 2010 г.) / Ред. И. И. Маслова, С. А. Коркина. М.: Академия МНЭПУ, 2010. С. 91–98.

Унифицированные методы исследования качества вод // Микробиологические методы. М.: Секретариат СЭВ, 1985. Ч. 4. 270 с.

Поступила в редакцию 20.12.2014

References

Borodulina G. S. Podzemnye vody [Underground waters]. Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie [Water objects of Petrozavodsk. Manual]. Eds. A. V. Litvinenko, T. I. Reherand. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. P. 31–41.

Bukharin O. V., Nemtseva N. V., Plotnikov A. O., Yatsenko-Stepanova T. N. Kompleksnyi mikrobiologicheskii analiz vody reki Chapaevka [Complex microbiological analysis of the Chapaevka River waters]. Bioindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya ravninnykh rek [Bioindication of the ecological state of lowland rivers]. Eds. O. V. Bukharin, G. S. Rozenberg. Moscow: Nauka, 2007. P. 178–183.

Garetova L. A. Kolichestvennye otsenki ekologicheskogo sostoyaniya mal'nykh rek Khabarovskogo kraja [Quantitative assessment of ecological condition of small rivers in Khabarovsk Region]. Presnovodnye ekosistemy basseina reki Amur [Freshwater ecosystems of the Amur River basin]. Vladivostok: Dal'nauka, 2008. P. 111–122.

Gigienicheskie trebovaniya k okhrane poverkhnostnykh vod: Sanitarnye pravila i normy (SanPiN 2.1.5.980–00) [Hygienic requirements to surface waters protection. Sanitary norms and rules (SanPiN 2.1.5.980–00)]. Moscow: Federal'nyi tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2000.

Kalinkina N. M., Sidorova A. I., Gridina A. A. Biotestirovanie vody reki Lososinki s ispol'zovaniem dvukh vidov rakoobraznykh [Biotesting of the Lososinka River water with two types of crustaceans]. Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie [Water objects of Petrozavodsk. Manual]. Eds. A. V. Litvinenko, T. I. Reherand. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. P. 84–86.

Karpechko V. A. Gidrograficheskaya i gidrologicheskaya kharakteristika vodotokov [Hydrographic and hydrological characteristics of watercourses] // Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie [Water objects of Petrozavodsk. Manual]. Eds. A. V. Litvinenko, T. I. Reherand. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. P. 25–27.

Katalog ozer i rek Karelii [Catalogue of lake and rivers of Karelia]. Eds. N. N. Filatov, A. V. Litvinenko. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2001. 290 p.

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov [Methods for studying of aquatic microorganisms]. Moscow: Nauka, 1989. 285 p.

Metodicheskie ukazaniya po sanitarno-mikrobiologicheskomu analizu vody poverkhnostnykh vodoemov [Guidelines for sanitary and microbiological analysis of water in the surface water reservoirs]. Min-vo zdra-vookhraneniya SSSR. Moscow, 1981. 36 p.

Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Braginskii L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenius V. G. Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya poverkhnostnykh vod sushi [The complex ecological classification of surface waters]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological Journal]. 1993. Vol. 29, No 4. P. 62–76.

Rekomendatsii Parlament'skikh slushanii «Ekologiya mal'nykh rek Rossii: problemy i puti ikh resheniya» [Recommendations of Parliamentary hearings «Ecology of small rivers of Russia. Problems and ways of their solution». *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov: obzornaya informatsiya* [Environmental and natural resources issues. Overview]. 2004. No 8. P. 72–79.

Romanenko A. V. Bakterioplankton [Bacterioplankton]. Ekosistema maloi reki v izmenyayushchikhsya usloviyakh sredy [Small river ecosystem affected by changing environmental conditions]. Eds. A. V. Krylov, A. A. Bobrov. Moscow: T-vo nauchn. izd. KMK, 2007. P. 101–110.

Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem [Guide on hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems]. Ed. V. A. Abakumov. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 318 p.

Ryzhkov L. P., Artem'eva N. V. Izmenenie biologicheskogo kachestva vody reki Neglinki – pritoka Onezhskogo ozera pod vliyaniem antropogennoi nagruzki [Changes in biological quality of the Neglinka River (tributary of Lake Onego) waters under anthropogenic load]. Ekosistemy mal'nykh rek: bioraznoobrazie, biologiya, okhrana: tezisy dokladov Vserossiiskoi konferentsii [Ecosystems of small rivers. Biodiversity, biology and conservation. Abstr. rep. All-Russian conference]. Borok, 2004. 75 p.

Ryzhkov L. P., Gorokhov A. V., Marchenko L. P. Transformatsiya khimicheskogo sostava vod reki Lososinki pod vozdeistviem prirodnykh i antropogennykh faktorov [Transformation of chemical composition of the Neglinka River waters under the impact of natural and anthropogenic factors]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of PetrSU]. 2012. No 8, vol. 1. P. 20–24.

Sabylina A. V. Sovremennyi gidrokhimicheskii rezhim ozera [Current hydrochemical regime of the lake]. Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy [Lake Onego. Ecological problems]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. P. 58–108.

Timakova T. M. Mikrobiologicheskaya otsenka sostoyaniya urbanizirovannykh pritokov Onezhskogo ozera [Microbiological assessment of Onego Lake urban tributaries]. Sotsial'no-ekonomicheskie aspekty ustoichivogo razvitiya chelovechestva: materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moskva-Penza, 13–14 maya 2010 g.) [Socioeconomic aspects of sustainable development of humanity. Proc. of the 1st intern. sci. and pract. conf. (Moscow-Penza, 13–14 May, 2010)].

Eds. I. I. Maslova, S. A. Korkina. Moscow: Akademiya MNEPU, 2010. P. 91–98.

Unifitsirovannye metody issledovaniya kachestva vod [Unified methods of water quality survey]. *Mikrobiologicheskie metody [Microbiological methods]*. Moscow: Sekretariat SEV, 1985. Part. 4. 270 p.

Zhmur N. S. Metodika opredeleniya toksichnosti vody i vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov po smertnosti i izmeneniyu plodovitosti tseriodafnii [A method for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, and other wastes on the basis of data on the death rate and fertility rate of ceriodaphnia]. Moscow: AKVAROS, 2001. 52 p.

Received December 20, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Теканова Елена Валентиновна

старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: etekanova@mail.ru
тел.: (8142) 576520

Макарова Елена Михайловна

главный гидробиолог лаборатории гидробиологии
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: emm777@bk.ru

Калинкина Наталия Михайловна

зав. лаб. гидробиологии, д. б. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: cerioda@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Tekanova, Elena

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: etekanova@mail.ru
tel.: (8142) 576520

Makarova, Elena

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: emm777@bk.ru

Kalinkina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: cerioda@mail.ru

ГИДРОХИМИЯ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

УДК 551.312:54 (282.247.212)

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОЕМА

**Н. А. Белкина, Д. А. Субетто, Н. А. Ефременко, М. С. Потахин,
Н. В. Кулик**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

На основании данных по химическому составу донных отложений аккумуляционных зон северной части Ладожского озера установлено, что в глубоководном районе в поверхностном окисленном слое донных отложений происходит накопление биогенных элементов, содержание которых увеличивается с глубиной водоема и степенью дисперсности осадка. В заливах, подвергающихся значительному антропогенному воздействию, встречаются восстановленные донные отложения, характеризующиеся более высокими показателями потребления кислорода илом, скорости деструкции органического вещества и потоков элементов, поступающих из донных отложений в воду. Изменения в распределении элементов по вертикали осадков указывают на то, что антропогенное влияние на водоем сравнимо с действием природных факторов.

Ключевые слова: донные отложения; биогенные элементы; эвтрофирование.

**N. A. Belkina, D. A. Subetto, N. A. Efremenko, M. S. Potakhin, N. V. Kulik.
THE CHEMICAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS IN NORTHERN
LAKE LADOGA AS AN INDICATOR OF LONG-TERM VARIATIONS IN THE
LAKE ECOSYSTEM**

The chemical composition of Lake Ladoga sediments was studied. Nutrients were found to accumulate in the oxidized top layer of the sediments in the deep-water part of the lake. The content of P, N, Fe, Mn increased with water depth and where the sediments had a finer particle size composition. Bays exposed to considerable human impact contained sediments formed under reducing conditions, with higher oxygen demand and high rates of organic matter decomposition. Nutrient flows from the sediments to the water column corresponded to the level typical of eutrophic lakes. Changes in the distribution of nutrients down the sediment suggest that human activities in the catchment, even if short-term, are comparable in effect with the action of natural-climatic and tectonic factors.

Keywords: sediments; nutrients; eutrophication.

Введение

Ладожское озеро – крупнейший водоем Европы, охрана водных ресурсов которого объявлена стратегической задачей. На водосборной территории озера отмечается высокий уровень хозяйственной деятельности. Водоем используется для судоходства, товарного рыбоводства и рыбного промысла, служит источником питьевого, коммунально-бытового, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения и приемником сточных вод. Основной проблемой Ладожского озера является эвтрофирование [Озера..., 2013]. Интенсивная хозяйственная деятельность на водосборе и эксплуатация водных ресурсов озера во второй половине 20 века привели к резкому изменению трофического статуса водоема от олиготрофного к мезотрофному. Развитие процессов эвтрофирования в результате увеличения внешней биогенной нагрузки на озеро приводит к возрастанию количества детрита, поступающего на дно водоема. В свою очередь увеличение скорости седиментации органических веществ и биогенных элементов приводит к возрастанию интенсивности обменных процессов на границе вода-дно и увеличению внутренней биогенной нагрузки на водоем. История исследования процессов поступления биогенных веществ из донных отложений в воду насчитывает уже полвека [Bannerman et al., 1974; Россолимо, 1975; Bengtsson, 1975; Bostrom et al., 1982; Manning, Lum, 1983; Мартынова, 1984, 2010; Cornwell, 1985; Manning, 1987; Жукова, 2001; Выхристюк, Варламова, 2003 и др.]. Для Ладожского озера в работах Н. В. Игнатъевой было показано, что, несмотря на снижение внешней фосфорной нагрузки в начале девяностых годов, внутренняя нагрузка возросла. Так, суммарное поступление фосфора из донных отложений Ладожского озера в период 1959–1962 гг. оценивалось в 243 т/год, с 1985–1990 гг. – в 600 т/год. К 2000 г. эта величина достигла 875 т фосфора в год [Игнатьева, 2002].

В настоящее время по сравнению с восьмидесятыми годами прошлого века внешняя фосфорная нагрузка на Ладожское озеро уменьшилась в 2 раза (3000 т в год). Но проблема антропогенного эвтрофирования водоема остается актуальной. В 2013 г. лабораторией гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН была проведена оценка внешней биогенной нагрузки от точечных источников загрязнения и речного стока с территории карельского побережья. Исследования показали, что в настоящее время поступление азота в Ладожское озеро определяется природными факторами, поступление

взвешенных веществ и фосфора более чем на 50 % связано с антропогенными источниками. Главными причинами являются вынос фосфора с бывших сельхозугодий, рыбоводство и активное освоение побережья в рекреационных целях [Сточные воды..., 2014].

Цель данного исследования – выявление закономерностей накопления органического вещества, биогенных (P, N) и литофильных (Fe, Mn) элементов в поверхностном слое донных отложений северной части Ладожского озера в зависимости от степени антропогенного воздействия.

Северная Ладога делится на шхерную и глубоководную части. Распределение донных отложений по дну озера носит очаговый характер и определяется морфологией озерной котловины. Подводные гряды препятствуют обмену осадочным материалом между отдельными котловинами, которые таким образом представляют своеобразные конечные седиментационные бассейны для локальных источников загрязнения – промышленных объектов Приозерска, Сортавалы, Лахденпохьи, Питкяранты и др. Скорость современного осадконакопления в зоне максимальных глубин открытой части района изменяется от 0 до 1 мм год⁻¹, большие значения скоростей отмечены в ряде прибрежных районов, испытывающих антропогенное воздействие (районы г. Питкяранта – 1,6 мм год⁻¹; пос. Ляскеля – 1,5 мм год⁻¹; г. Сортавала – 1,0 мм год⁻¹) [Семенович, 1966; Субетто, 2002].

Объект и методы исследований

Исследования донных отложений проводились в северной части Ладожского озера. В представленной работе использованы данные химического анализа 200 проб донных отложений, полученные в рамках программ мониторинга в 1992–2006 гг., международных проектов «Эвтрофирование больших озер» (1997–1998 гг.) и «ПЛОТ – палеоолиминологический трансект» (2013 г.). Схема станций наблюдения представлена на рис. 1. Отбор проб донных отложений осуществлялся поршневой трубкой (модифицированный вариант стратометра Алексона [Nakanson, Jansson, 1983]). Химические анализы выполнены в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. В пробах измерялись величины pH и Eh, визуально оценивалась мощность окисленного слоя. В образцах натуральной влажности определялись: естественная влажность, потребление кислорода илом (ПК) (экспозиция в течение суток, скляночный метод), аммонийный азот, железо общее, марганец и минеральный

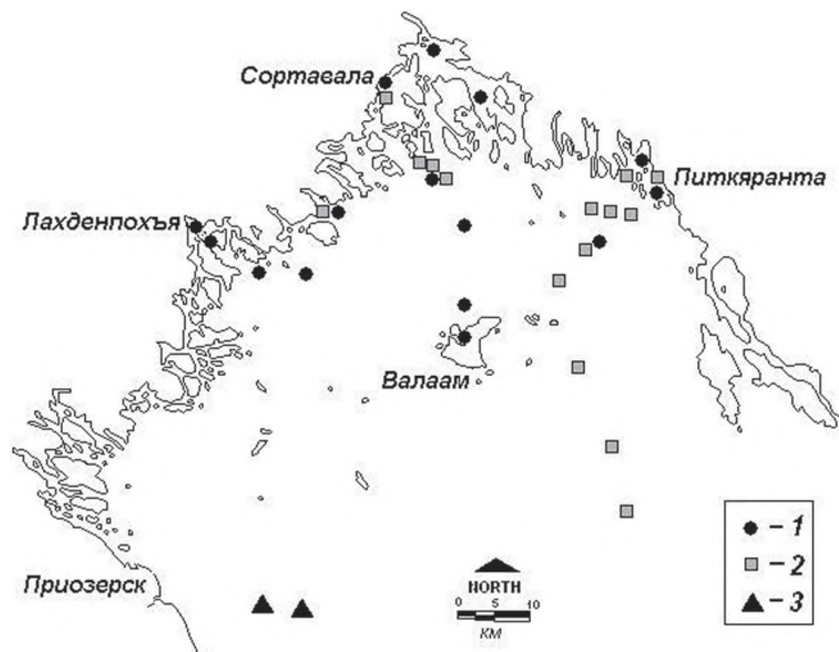


Рис. 1. Станции отбора проб донных отложений в Северной части Ладожского озера: 1 – 1992–2006 гг., 2 – 1997–1998 гг., 3 – 2013 г.

фосфор, растительные пигменты и феофитин. В воздушно-сухих образцах – потери при прокаливании (ППП), азот органический ($N_{орг}$) (метод Кьельдаля) и фосфор общий ($P_{общ}$), органический углерод (по ХПК) [Аринушкина, 1970].

Результаты и их обсуждение

На основании химического состава донных отложений, и в первую очередь по низкой величине ППП и небольшому содержанию $C_{орг}$, в настоящее время в северной части Ладожского озера идет накопление минеральных донных отложений (табл.). Различие седиментационных обстановок в водоеме определяет разнообразие донных отложений. На формирование донных отложений заливов значительное

влияние оказывают речной сток, рассеянные и точечные источники загрязнения. В районах, подвергавшихся ранее и испытывающих в данный момент влияние промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод предприятий лесной и целлюлозно-бумажной промышленности (Сортавальский, Питкярантский и Якимварский заливы), встречаются донные отложения с относительно высоким содержанием органических веществ и восстановительными условиями среды. Максимум органического вещества за весь период наблюдения был зафиксирован в 1993 году в районе сброса сточных вод Питкярантского целлюлозного завода ($C_{орг}$ – 10,8 %, ППП – 24 %, здесь и далее все расчеты выполнены на воздушно-сухой вес осадка). В таких осадках, как правило, преобладают

Физико-химические характеристики поверхностного (0–1 см) слоя донных отложений северной части Ладожского озера (1998–2013 гг.)

Показатель	Профундаль	Деклиналь	Заливы
pH	5,91–6,48	5,94–6,68	6,21–6,45
Eh, мВ	+230...+380	+30...+320	+90...+220
Естественная влажность, %	88–93	82–94	85–89
ППП, %	15–23	12–17	10–24
$C_{орг}$, %	3,1–6,2	2,5–3,5	2,3–10,3
Chla, мкг×г ⁻¹	2–4	2–8	7–170
$P_{общ}$, %	0,18–0,21	0,10–0,23	0,21–0,23
$P_{орг}$, %	0,06–0,28	0,07–0,29	0,12–0,35
$N_{орг}$, %	0,40–0,50	0,12–0,46	0,40–0,41
$N-NH_4^+$, %	0,04–0,10	0,02–0,04	0,02–0,16
Fe, %	2,1–6,7	2,1–9,4	2,0–6,4
Mn, %	0,4–4,3	0,2–1,4	0,1–0,2

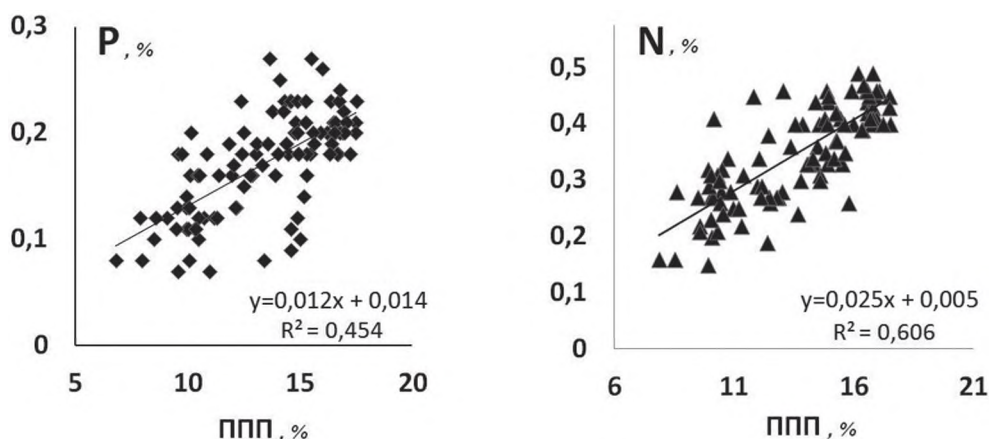


Рис. 2. Зависимость содержания фосфора общего и азота органического в донных отложениях Ладожского озера от потери при прокаливании

неорганические формы азота и фосфора [Белкина, Васильева, 1999].

В открытой части северной Ладоги особенности переноса и осаждения взвесей обуславливаются циклональным характером плотностных течений. Горизонтальный перенос в зону наибольших глубин происходит медленно, и именно деklinальная зона является местом первоначального накопления взвесей. Результатом таких особенностей седиментогенеза является пестрота в распределении осадков и отсутствие значимых различий в содержании изученных компонентов в поверхностном слое донных отложений профундали и деklinали (табл.).

Исследование пространственного и вертикального распределения химических элементов на геохимическом барьере (слой донных отложений 0–15 см) в северной части Ладожского озера в 1997–2004 гг. показало, что содержание $C_{\text{орг}}$ (от 0,4 до 6 %), $P_{\text{общ}}$ (от 0,05 до 0,7 %), $N_{\text{общ}}$ (от 0,05 до 4 %), Fe (от 1 до 8 %), Mn (от 0,05 до 2 %) в донных отложениях достигает значений выше кларковых и, как правило, увеличивается с глубиной водоема и степенью дисперсности осадка. Наиболее высокое содержание органического вещества отмечено в осадках северного шхерного района, особенно в высокопродуктивном Сортавальском заливе ($C_{\text{орг}}$ – 6 %, Chl *a* – 170 мкг/г, C: N – 20, C: P – 40) и заливе Хиденселькя ($C_{\text{орг}}$ – 6 %, Chl *a* – 20 мкг/г, C: N – 40, C: P – 60). Количественный и качественный составы органического вещества деklinальной и профундальной зон близки (средние значения $C_{\text{орг}}$ – 3 %, Chl *a* – 3 мкг/г, C: N – 10, C: P – 80). Поступление азота в донные отложения обычно связано с седиментацией органического вещества. На поступление фосфора в донные отложения водоемов гумидной зоны влияет не только органическое вещество, но и седиментация

железосодержащих взвесей. Поэтому зависимость содержания этих элементов в осадке от ППП в случае азота имеет более высокий коэффициент детерминации (рис. 2). В работе, опубликованной ранее [Белкина, 2011], было показано, что донные отложения заливов характеризуются более высокими показателями потребления кислорода илом (до $1,6 \text{ г O}_2 \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$) и скоростями деструкции органического вещества (до $2,1 \text{ г C} \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$). Потребность в кислороде донных отложений открытой части изменяется от 0,05 до $1 \text{ г O}_2 \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$, скорость разложения органического вещества – от 0,02 до $0,2 \text{ г C} \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$.

Низкие скорости осадконакопления, а также количественный и качественный состав органического вещества, поступающего в донные отложения открытой части озера, являются причиной того, что повсеместно на окислительно-восстановительной границе отмечается образование рудных прослоек, обогащенных марганцем, железом и фосфором. Процессы трансформации органического вещества в донных отложениях открытой части озера в отличие от заливов происходят в окислительной среде. Мощность окисленного слоя достигает 5 см. Окрашенные соединения железа и марганца позволяют визуально определить положение геохимического барьера в донных отложениях. Значения окислительно-восстановительного потенциала поверхностного окисленного слоя донных отложений на 200–300 мВ выше, чем значения Eh осадков, залегающих в глубине колонки. Вертикальное распределение биогенных элементов в донных отложениях и поровых водах графически описывается кривыми нескольких типов – от монотонно убывающих или возрастающих по толщине керна до графиков с ярко выраженными минимумами или максимумами на разной глубине (рис. 3).

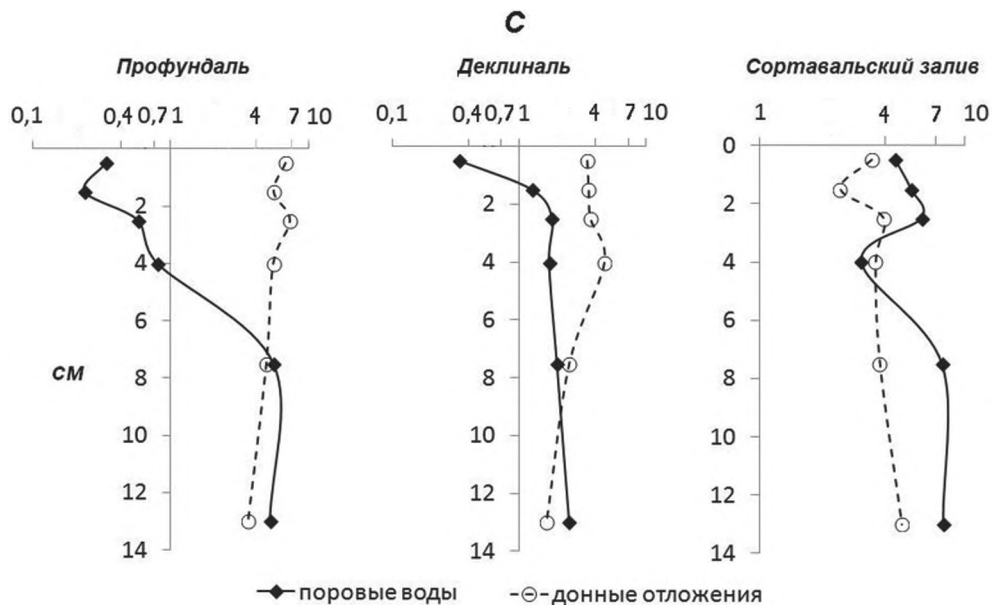


Рис. 3. Распределение железа в поровых водах (мгFe/л) и в донных отложениях (%) Ладожского озера

Наиболее резкие изменения содержания этих элементов отмечены в зоне окислительно-восстановительного барьера. Максимум Eh, как правило, соответствует максимуму содержания марганца. Далее мы наблюдаем максимумы концентраций железа и фосфора. Удержание фосфора в донных отложениях глубоководного района происходит главным образом за счет увеличения доли железо-связанного фосфора (до 40 % от общего) [Белкина и др., 2006]. Что касается «транзитной» зоны, то, к примеру, на выходе из Sortavalskiy залива, в зоне активных течений, наблюдалась инверсия профиля Eh: поверхностный слой осадка имел более низкие значения Eh, чем на глубине [Белкина, 2014]. В заливах, подверженных антропогенному влиянию, положение редокс-границы совпадает с границей раздела вода-дно, что приводит к иммобилизации и концентрации редокс-чувствительных элементов в поверхностном слое донных отложений. В результате фосфор поступает в воду не только в ходе деструкции фосфорсодержащих органических соединений, но и за счет восстановления соединений железа и высвобождения Fe-связанного фосфора. В ходе исследований было выявлено, что в районах, подверженных влиянию точечных источников загрязнения, 30 % фосфора, поступающего на дно, возвращается в воду. Величина потока ($1 \text{ мг P/м}^2 \text{ сут.}^{-1}$) более чем на порядок превышает значения потоков фосфора из донных отложений открытой части озера. Донные отложения глубоководного района обладают высокой удерживающей способностью и минимальной отдачей биогенных элементов в воду [Белкина и др., 2006].

Сравнение характеристик донных отложений профундали северной части Ладожского озера, полученных в двухтысячные годы, с результатами вертикального распределения элементов в колонках донных отложений, отобранных в 2013 г., показало, что в настоящее время в донных отложениях Ладожского озера наметилась тенденция снижения концентрации биогенных элементов в поверхностном слое, а следовательно, и уменьшение их поступления из донных отложений обратно в воду. Уменьшились значения потребления кислорода илом. Такие изменения в составе седиментационного материала, накапливающегося в донных отложениях, связаны с уменьшением продукционных процессов в озере. Более высокие концентрации органического вещества, поступившего в донные отложения в период антропогенного эвтрофирования в восьмидесятые годы прошлого столетия, привели к развитию восстановительных процессов и перераспределению железа и марганца по вертикали в поверхностном (0–15 см) слое осадка. Локальные максимумы железа (3 % в слое 3–5 см) и фосфора общего (0,4 % в слое 8–10 см) соответствуют максимумам концентраций этих элементов на глубине 30 см (рис. 4). Концентрация азота и значения ППП в этом слое монотонно убывают с глубиной. Содержание марганца (1 %) в поверхностном слое на порядок превышает его среднее содержание по колонке. Образование рудных прослоев, начало формирования которых зафиксировано в поверхностном слое вышеуказанной колонки, способствует захоронению веществ в донных отложениях и снижению внутренней биогенной нагрузки,

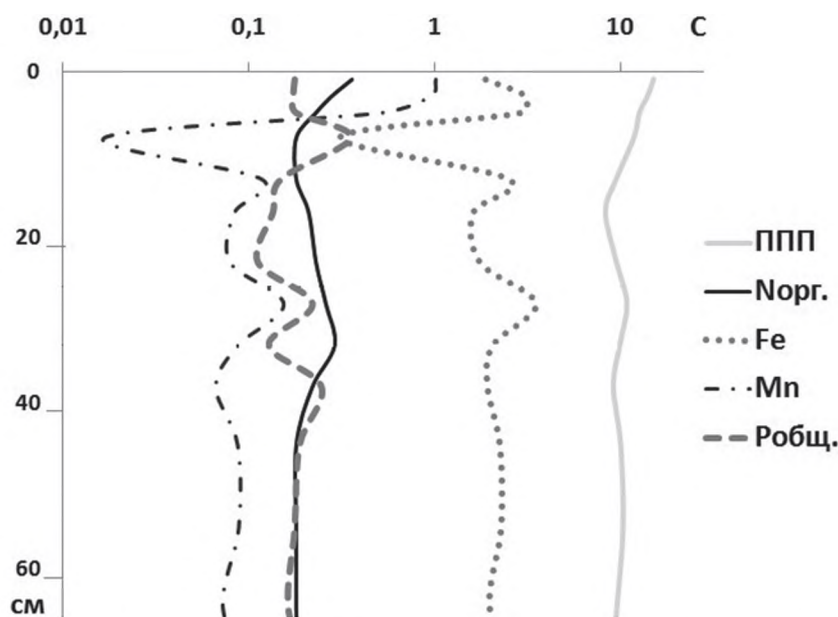


Рис. 4. Распределение Fe, Mn, $P_{общ.}$, $N_{орг.}$, ППП в донных отложениях Ладожского озера, 2013 г.

а следовательно, и снижению продукционных процессов в водоеме.

Естественные изменения трофического статуса экосистемы Ладожского озера в голоцене, связанные с колебаниями климата, происходили на протяжении 7000 лет с момента дегляциации котловины в результате потепления при переходе от сухого холодного климата позднеледникового периода до влажного и теплого атлантического периода (олиготрофный → мезотрофный). Последующие 3000 лет, по-видимому, мог наблюдаться обратный процесс (мезотрофный → олиготрофный) в результате похолодания климата при переходе от атлантического периода к суббореальному, а затем снова усиление процесса эвтрофикации в результате как потепления климата, так и усиления антропогенного влияния в последнее столетие. Резкое изменение характера накопления органического вещества в донных отложениях, связанное с геологическими процессами, произошло 3100 л. н., когда в результате прорыва р. Невы снизился уровень озера. Изменение продукционных процессов в водоеме отражается на вертикальном распределении органического вещества и биогенных элементов по колонке донных отложений: локальные максимумы соответствуют увеличению продукции, локальные минимумы – ее снижению. Концентрационный профиль $N_{орг.}$ и ППП указывает на устойчивый рост продукционных процессов в озере на протяжении последних 2000 лет. Формирование в пограничной зоне прослоек, обогащенных Mn и Fe, является индикатором снижения скорости поступления органических веществ

в донные отложения в настоящее время. Наиболее вероятной причиной уменьшения продукции экосистемы в настоящее время является снижение внешней биогенной нагрузки. Можно предположить, что если внешняя нагрузка не увеличится, то в донных отложениях продолжится формирование рудного прослоя, способствующего захоронению и изъятию органического вещества и биогенных элементов из круговорота в экосистеме. Если же продукция экосистемы возрастет и в донные отложения поступит органическое вещество, достаточное для того, чтобы восстановить Fe и Mn запирающего слоя, резко возрастет внутренняя биогенная нагрузка, причем поступить в водную толщу потенциально способен весь пул биогенных элементов, накопленных за длительный период в поверхностном (0–15 см) слое.

Заключение

В настоящее время в глубоководном районе северной части Ладожского озера на геохимическом барьере в поверхностном слое донных отложений происходит накопление органического вещества и биогенных элементов. В целом содержание азота, фосфора, марганца и железа увеличивается с глубиной водоема и степенью дисперсности осадка. Образование рудных прослоев, удерживающих органическое вещество и биогенные элементы в донных отложениях, способствует стабилизации, а возможно, при снижении внешней биогенной нагрузки на озеро, и понижению трофического уровня водной экосистемы.

В заливах, подвергающихся антропогенному влиянию, встречаются донные отложения с относительно высоким содержанием органических веществ и восстановительными условиями среды, характеризующимися более высокими значениями потребления кислорода илом, скорости деструкции органического вещества и потоков элементов, поступающих из донных отложений в воду.

Изменения в распределении биогенных элементов по колонке донных отложений указывают на то, что хозяйственная деятельность на водосборе Ладожского озера, даже кратковременная, сравнима с воздействием на экосистему озера природно-климатических и геологических факторов.

Авторы выражают благодарность д. х. н. П. А. Лозовику за консультационную помощь при обсуждении результатов исследования.

Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Водные проблемы Севера и пути их решения. Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–41.

Белкина Н. А., Васильева Е. П. Оценка загрязненности донных отложений северной части Ладожского озера // Водные ресурсы. 1999. Т. 26, № 1. С. 112–114.

Белкина Н. А. Изменение окислительно-восстановительного состояния озерных донных отложений под влиянием антропогенных факторов (на примере Ладожского и Онежского озер) // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 3. С. 172–176.

Белкина Н. А., Сандман О., Игнатъева Н. В. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) // Экологическая химия. 2006. № 15 (3). С. 174–185.

Выхристюк Л. А., Варламова О. Е. Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Тольятти: Самарский науч. центр РАН, 2003. 174 с.

References

Arinushkina E. V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Manual on chemical analysis of soils]. Moscow: MGU, 1970. 487 p.

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogenykh elementov v ozernykh ekosistemakh [Role of

Жукова Т. В. Потоки фосфора и азота в пограничном слое «дно-вода» и их роль в функционировании полимиктических озер: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Минск, 2001. 39 с.

Игнатъева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 148–156.

Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984. 160 с.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических систем. М.: Наука, 2010. 243 с.

Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов и В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Россолимо Л. Л. Антропогенное эвтрофирование водоемов // Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М.: Наука, 1975. Т. 2. 860 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера. М.; Л.: Наука, 1966. 124 с.

Сточные воды Приладожья и притоков Ладожского озера // Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2013 г. Петрозаводск, 2014. С. 65–68.

Субетто Д. А., Игнатъева Н. В., Давыдова Н. Н. и др. Донные отложения и их роль в оценке эволюции Ладожского озера // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 122–164.

Bannerman R. T., Armstrong D. E., Holdren G. C., Harris R. F. Phosphorus mobility in Lake Ontario sediments (IFYGL) // Proc. 17th Conf. Great Lakes Res. 1974. P. 158–178.

Bengtsson L. Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment // Verh. Internat. Verein. Limnol. 1975. No 19. P. 1107–1116.

Bostrom B., Jansson M., Forsberg C. Phosphorus release from lake sediments // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 1982. No 18. P. 5–59.

Cornwell J. C. The geochemistry of manganese, iron and phosphorus in an arctic lake: Diss. abst. int. pt. B.-Sci. & Eng. 1985. 45 (9). 249 p.

Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.

Manning P. G., Lum K. R. Forms of iron, phosphorus and trace-metal ions in a layered sediment core from Lake Ontario // Can. Mineral. 1983. No 22. P. 121–128.

Manning P. G. Phosphate ion interactions at the sediment-water interface in Lake Ontario: relationship to sediment adsorption capacities // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1987. No 44. P. 2204–2211.

Поступила в редакцию 23.12.2014

sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Vodnye problemy Severa i puti ikh resheniya* [Transactions of KarRC RAS. Water problems of the North and their solution]. 2011. No 4. P. 35–41.

Belkina N. A., Vasil'eva E. P. Otsenka zagryaznenosti donnykh otlozhenii severnoi chasti Ladozhskogo ozera [Assessment of the sediment pollution in the northern part of Lake Ladoga]. *Vodnye resursy [Water resources]*. 1999. Vol. 26, No 1. P. 112–114.

Belkina N. A. Izmenenie oksiditel'no-vosstanovitel'nogo sostoyaniya ozernykh donnykh otlozhenii pod vliyaniem antropogennykh faktorov (na primere Ladozhskogo i Onezhskogo ozer) [Changes in redox state of the lake sediments under anthropogenic load (case study of Lakes Ladoga and Onego)]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Environment. Development]*. 2014, No 3. P. 172–176.

Belkina N. A., Sandman O., Ignat'eva N. V. Rasprezhenie form fosfora v donnykh otlozheniyakh kak pokazatel' evtrofirovaniya ekosistemy bol'shogo vodoema (na primere Ladozhskogo i Onezhskogo ozer) [Distribution of sedimentary phosphorus forms as an indicator of eutrophication of ecosystem in a large reservoir (case study of Lakes Ladoga and Onego)]. *Ekologicheskaya khimiya [Ecological chemistry]*. 2006. No 15 (3). P. 174–185.

Ignat'eva N. V. Rol' donnykh otlozhenii v krugovoroze fosfora v ozernoi ekosisteme [The role of bottom sediments in phosphorus cycling in lake ecosystem]. Ladozhskoe ozero: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Lake Ladoga: past, present and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002, P. 148–156.

Martynova M. V. Azot i fosfor v donnykh otlozheniyakh ozer i vodokhranilishch [Nitrogen and phosphorus in bottom sediments of lakes and reservoirs]. Moscow: Nauka, 1984. 160 p.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh sistem [Bottom sediments as a component of limnological systems]. Moscow: Nauka, 2010. 243 p.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]. Eds. N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. 464 p.

Rossolimo L. L. Antropogennoe evtrofirovanie vodomov [Anthropogenic eutrophication of water bodies]. *Obshchaya ekologiya. Biotsenologiya. Gidrobiologiya [General ecology. Biocenology. Hydrobiology]*. Moscow: Nauka, 1975. Vol. 2. 860 p.

Semenovich N. I. Donnye otlozheniya Ladozhskogo ozera [Bottom sediments of Lake Ladoga]. Moscow; Leningrad: Nauka, 1966. 124 p.

Stochnye vody Priladozh'ya i pritokov Ladozhskogo ozera [Wastewater in Priladozhje and tributaries of Lake Ladoga]. Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Kareliya v 2013 g. [State report on the condition of the environment of the Republic of Karelia in 2013]. Petrozavodsk, 2014. P. 65–68.

Subetto D. A., Ignat'eva N. V., Davydova N. N., Sergeeva L. V., Krylenkova N. L. Donnye otlozheniya i ikh rol' v otsenke evolyutsii Ladozhskogo ozera [Bottom sediments and their role in assessing the evolution of Lake Ladoga]. Ladozhskoe ozero, proshloe, nastoyashchee, budushchee [Lake Ladoga: past, present and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 122–164.

Vykhristyuk L. A., Varlamova O. E. Donnye otlozheniya i ikh rol' v ekosisteme kuibyshevskogo vodokhranilishcha [Bottom sediments and their role in the ecosystem of the Kuibyshev Reservoir]. Tol'yatti: Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2003. 174 p.

Zhukova T. V. Potoki fosfora i azota v pogranichnom sloe «dno-voda» i ikh rol' v funktsionirovanii polimikticheskikh ozer [Phosphorus and nitrogen flows in a boundary layer «bottom-water» and their role in polymictic lakes functioning]: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk [PhD Diss. (Biol.)]. Minsk. 2001. 39 p.

Bannerman R. T., Armstrong D. E., Holdren G. C., Harris R. F. Phosphorus mobility in Lake Ontario sediments (IFYGL). *Proc. 17th Conf. Great Lakes Res.* 1974. P. 158–178.

Bengtsson L. Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1975. No 19. P. 1107–1116.

Bostrom B., Jansson M., Forsberg C. Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 1982. No 18. P. 5–59.

Cornwell J. C. The geochemistry of manganese, iron and phosphorus in an arctic lake: diss. abst. int. pt. B.-Sci. & Eng. 1985. 45(9). 249 p.

Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.

Manning P. G., Lum K. R. Forms of iron, phosphorus and trace-metal ions in a layered sediment core from Lake Ontario. *Can. Mineral.* 1983. No 22. P. 121–128.

Manning P. G. Phosphate ion interactions at the sediment-water interface in Lake Ontario: relationship to sediment adsorption capacities. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1987. No 44. P. 2204–2211.

Received December 23, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Белкина Наталья Александровна
старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: bel110863@mail.ru
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTORS:

Belkina, Natalia
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bel110863@mail.ru
tel.: (8142) 576541

Субетто Дмитрий Александрович

директор, д. г. н., профессор
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: subetto@mail.ru
тел.: (8142) 578464

Ефременко Наталья Анатольевна

ведущий химик
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: efremna@mail.ru
тел.: (8142) 576541

Потакхин Максим Сергеевич

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: potakhin@nwpi. krc.karelia.ru
тел.: (8142) 578464

Кулик Наталья Владимировна

аспирант
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nadiet11@rambler.ru
тел.: (8142) 576541

Subetto, Dmitry

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: subetto@mail.ru
tel.: (8142) 578464

Efremenko, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: efremna@mail.ru
tel.: (8142) 576541

Potakhin, Maksim

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: potakhin@nwpi. krc.karelia.ru
tel.: (8142) 578464

Kulik, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nadiet11@rambler.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 624.131.41

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СЕВЕРА ФЕННОСКАНДИИ В ПОСЛЕДНИЕ СТОЛЕТИЯ

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

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН

Для изучения тенденций изменения нагрузки тяжелых металлов на водосборы озер Севера Фенноскандии и их экологического состояния были отобраны колонки донных отложений (ДО) озер приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией, находящейся в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель». В пробах ДО было проведено определение возраста по хронологии ^{210}Pb . Установлено, что средние скорости осадконакопления в исследуемых озерах довольно постоянны и находятся в пределах 0,7–1,6 мм/год. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в ДО озер обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920–30-ми годами, а максимальный рост зафиксирован в 70–80-е годы прошлого столетия, как результат металлургической деятельности в этом регионе. Заметный рост концентраций Pb в датированных ДО зафиксирован в начале 18 века. Снижение содержания Pb в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер и датируется одним-двумя последними десятилетиями. Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат также Hg, As и Cd, начало загрязнения которыми датируется началом-серединой 19 в.

Ключевые слова: тяжелые металлы; донные отложения; озера; Север Фенноскандии; датирование.

V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin, D. B. Denisov. TENDENCIES IN THE CONTENT CHANGE OF HEAVY METALS IN LAKE SEDIMENTS IN NORTHERN FENNOSCANDIA OVER THE LAST CENTURIES

To study trends in the heavy metal load on lake catchments in Northern Fennoscandia and their ecological status, lake sediment cores were collected in the border area between Russia, Norway and Finland within the impact zone of the «Pechenganikel» smelter emissions. Age determination by ^{210}Pb chronology was carried out in the sediment samples. The average sedimentation rate in the studied lakes was found to be fairly constant and range within 0.7–1.6 mm/year. A rise Ni, Cu and Co levels in lake sediments was generally found in the layers dates to the 1920s–1930s, and the greatest increase happened in the 1970s–1980s as a result of mining and metal processing in the region. A marked increase in Pb concentrations in the dated sediments was recorded at the beginning of the 18th century. Pb amounts in the surface layer of the sediments have been decreasing in most of the lakes over the past one or two decades. Hg, As and Cd also serve as markers of contamination of the catchments. According to our datings, contamination by the latter elements began in the early or mid-19th century.

Keywords: heavy metals; sediments; lakes; Northern Fennoscandia; dating.

Введение

Приграничная территория между Россией, Норвегией и Финляндией испытывает серьезное антропогенное влияние, в том числе со стороны комбината «Печенганикель». Вся система пограничной реки Пасвик, а также озера и реки данного района, входящие в водосбор этой реки, подвергаются загрязнению посредством атмосферных выпадений. К основным загрязняющим веществам относятся соединения серы и тяжелых металлов (ТМ) – Ni, Cu, Cd, Zn, As, Hg и др., полициклические ароматические углеводороды и стойкие органические загрязнители. Выбросы диоксида серы приводят к закислению поверхностных вод и их загрязнению вследствие интенсификации процессов выщелачивания элементов из горных пород.

Исследование химического состава толщи ДО позволяет восстановить историю условий формирования озер, базируясь на определении фоновых значений содержания различных элементов в ДО и изменений их поступления в течение длительного периода времени. Особую научную значимость они приобретают, когда известна скорость осадконакопления, что позволяет реконструировать хронологию процессов, происходивших на территории водосбора и в самом озере.

Для оценки истории регионального загрязнения водосборных бассейнов приграничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией начиная с 90-х годов прошлого века использовались палеолимнологические исследования, радиометрическое датирование образцов колонок ДО и определение возраста по хронологии ^{210}Pb с применением модели датирования CRS и CIC [Appleby, Oldfield, 1978]. По результатам датирования ДО были определены скорости осадконакопления, поток осадочного материала и аккумуляция отдельных элементов в ДО [Norton et al., 1992, 1996; Rognerud et al., 1993]. Хронология по ^{210}Pb с уверенностью может быть использована только до 150 лет, т. к. период полураспада этого изотопа 22 года. Возраст ДО экстраполирован далее по времени, основываясь на скорости аккумуляции в период 1850–1900 гг., и таким образом был определен качественно. Средние скорости осадконакопления за последние полтора столетия в озерах довольно постоянны и оценивались равными 0,3–1,25 мм/год.

С целью изучения изменений интенсивности антропогенной нагрузки, в том числе выбросов комбината «Печенганикель», на водосборы озер были проведены исследования по

вертикальному распределению концентраций ТМ в ДО исследуемых озер, находящихся на различном расстоянии от плавильных цехов.

Материалы и методы

Разработка печенгских медно-никелевых месторождений началась в 1932 г. совместной канадско-финской компанией (после Октябрьской революции территория нынешнего Печенгского района отошла к Финляндии до возвращения в состав СССР по окончании советско-финской войны в 1940 г.). Комбинат «Печенганикель» функционирует с 1946 г., когда в пос. Никель возобновилась переработка местных сульфидно-никелевых руд. В 1959 г. развернулась добыча руд Ждановского месторождения и их переработка на заводе в г. Заполярный. В состав выбросов комбината входят сернистый газ, Ni, Cu, пыль, а также оксиды N и оксид S (II) от котельных [Крючков, Макарова, 1989]. Начиная с 1971 г. здесь ведется переработка высокосернистой (содержание S достигает 30 %) Cu-Ni-руды Норильского горно-металлургического комбината. Максимальные выбросы основных загрязняющих веществ, в том числе ТМ, были зафиксированы в 80-е годы XX столетия. В пограничном слое атмосферы (до 1500 м) воздушные потоки переносят выбросы медно-никелевых комбинатов на дальние расстояния с запада на восток, т. е. не в направлении сопредельных западных государств [Крючков, Макарова, 1989], поэтому именно сточные воды комбината «Печенганикель», а не атмосферные выбросы – главный источник загрязнения Ni, Cu, Co и другими ТМ, выбрасываемыми комбинатом, нижнего течения р. Пасвик. За 80-летнюю историю деятельности комбината в водоемы и в атмосферу отправлены миллионы тонн сернистого газа, тысячи тонн Ni, Cu, Co и других сопутствующих ТМ.

В рамках проекта «Коларктик» для изучения экологического состояния озер и изменений интенсивности антропогенной нагрузки на приграничную территорию между Россией, Норвегией и Финляндией в 2012–2013 годах были отобраны колонки ДО из 16 озер (рис. 1).

Колонки ДО взяты в наиболее глубоких местах исследуемых водоемов отборником колонок ДО открытого гравитационного типа (внутренний диаметр 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой. Отборник изготовлен из плексигласа по образцу, разработанному Скогхеймом [Skogheim, 1979], он позволяет транспортировать колонки ненарушенными для дальнейшего использования. Длина колонок

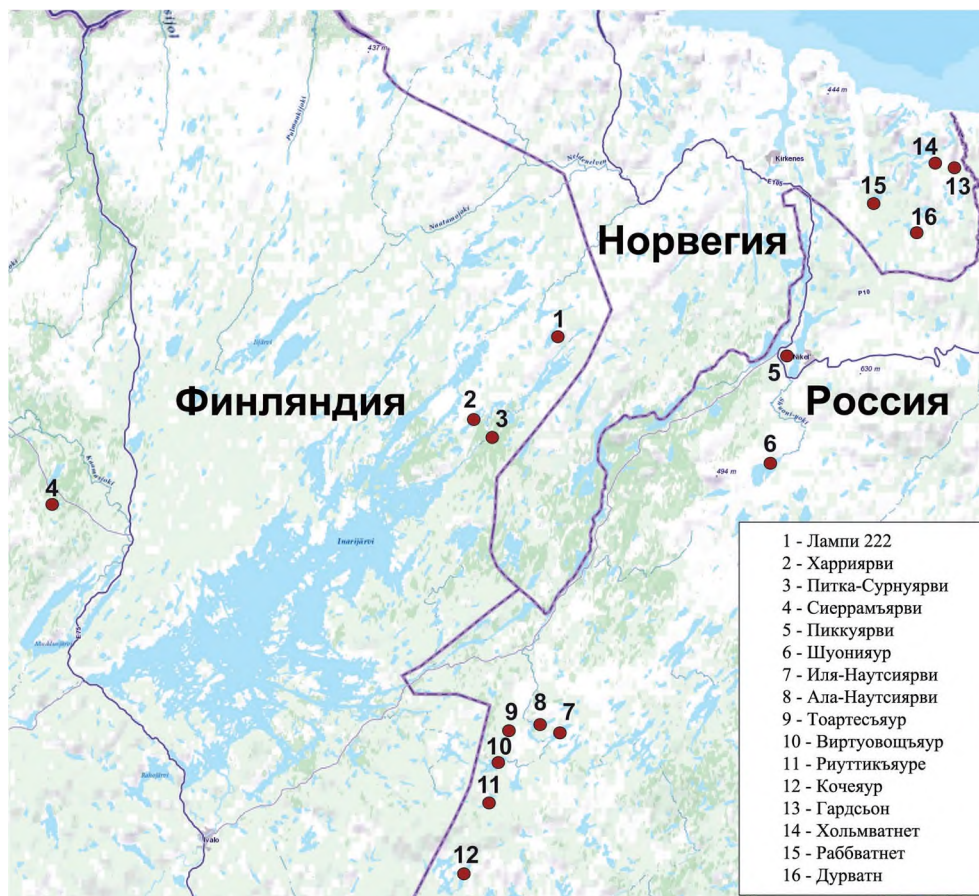


Рис. 1. Схема расположения исследуемых озер пограничной территории между Россией, Норвегией и Финляндией (2012–2013 гг.)

ДО составляла от 15 до 45 см, в зависимости от условий их формирования и физико-химических особенностей. Колонки ДО были разделены на слои по 1 см, помещены в полиэтиленовые контейнеры и отправлены для анализа в лабораторию, где хранились при температуре 4 °С до анализа. Первичная обработка проб ДО (высушивание, определение влажности, прокаливание и определение потерь при прокаливании) и определение содержания элементов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, Hg, Mn, Fe, Ca, Mg, Na, K, Al, Cr, P, Sr) проводились в лабораториях Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) Кольского научного центра РАН. Подробно методика определения содержания элементов описана ранее [Даувальтер и др., 2012; Даувальтер, 2012].

Для оценки долговременных изменений, происходивших на водосборной площади озерно-речной системы Пасвик, использовались данные хемотратиграфических анализов ДО малых озер. Палеоэкологические исследования и реконструкция истории развития водных экосистем невозможна без корректной оценки скоростей осадконакопления, позволяющей определить возраст исследуемых ДО. Анализ

содержания радионуклидов и расчет средних скоростей осадконакопления был выполнен для шести исследуемых озер в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН. Определение активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{210}Pb в пробах ДО проводили с использованием метода неинвазивной гамма-спектрометрии на низкофоновом гамма-спектрометре Canberra Industries с полупроводниковым детектором на основе особо чистого Ge с активным диаметром 70 мм и толщиной 25 мм. Рассчитанные величины абсолютных скоростей седиментации шести водоемов указаны в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Главным источником поступления Ni, Cu, Co и других ТМ в окружающую среду приграничной территории является комбинат «Печенганикель». Это ясно из исследований водных и наземных экосистем региона [Rognerud, 1990; Traaen et al., 1991; Dauvalter, 1992, 1994, 1998, 2003; Rognerud, Fjeld, 1993; Rognerud et al., 1993, 1998, 2013; Åjrås et al., 1995, 1997; Moiseenko et al., 1995; Даувальтер, 1995, 1997,

Таблица 1. Рассчитанные величины абсолютных скоростей осадконакопления исследованных водоемов

Озеро	Длина колонки ДО, мм	Скорость седиментации, мм/ год	Примерный возраст колонки ДО, лет
Кочеяур	160	1,5	106
Виртуовощьяур	180	0,7	257
Шуонияур	140	0,7	210
Ала-Наутсиярви	175	1,6	106
Харриярви	300	1,3	240
Раббватнет	440	0,65	687

1998, 1999, 2002, 2012; Cariat et al., 1996a, b; Gregurek et al., 1999; Reimann et al., 1999; Dauvalter, Rognerud, 2001; Lukin et al., 2003; Dauvalter, Sandimirov, 2007; Kashulin et al., 2008; Current State..., 2008; Кашулин и др., 2009; Барышев, 2010; Dauvalter et al., 2011]. Увеличение концентраций и скоростей аккумуляции ТМ датируется за десятилетие до начала индустриальной деятельности комбината «Печенганикель». Увеличение обычно обнаруживалось в ДО, датированных 1920–30-ми годами [Rognerud et al., 1993; Norton et al., 1996]. Этому явлению существует три объяснения. Во-первых, региональное загрязнение Со, Си и Ni, возможно, существовало как результат деятельности металлургических предприятий в промышленных районах России. До 1940 г. Печенгский район был территорией Финляндии, где уже начала осваиваться рудничная база. В начале 20 в. началась разработка железорудного месторождения Бьорневатн, расположенного в нескольких километрах от комбината на другом берегу р. Пасвик. Во-вторых, ТМ из водной толщи озер могут оседать и перераспределяться в ДО, которые датируются временем до начала антропогенных нагрузок. Такие диагенетические процессы уже описывались для Zn [Carignan, Tessier, 1985] и других ТМ. И в-третьих, в ДО, датированных 20–30-ми годами прошлого столетия, возрастает содержание органического вещества (в оз. Дальватн значения ППП увеличиваются с 29 до 38 %, в оз. Дурватн – с 27 до 30 %), что является существенной причиной увеличения адсорбции ТМ осадками [Norton et al., 1992]. Синхронность повышения к поверхности концентраций ТМ в ДО изолированных озер, имеющих сходную геохимическую природу, вероятно, указывает на то, что атмосферные выпадения, а не специфические процессы водосбора, являются причиной повышенной аккумуляции ТМ.

Настоящими исследованиями установлено, что наиболее загрязненными одним из приоритетных загрязняющих ТМ – медью – являются российские озера (Пиккуярви, Шуонияур), расположенные ближе к источнику выбросов этого

металла (комбинату «Печенганикель»), а также все исследуемые норвежские озера Ярфьорда, испытывающие интенсивное атмосферное загрязнение выбросами плавильных цехов комбината. Вертикальное распределение Си в ДО этих озер говорит о главенствующей роли атмосферных выбросов комбината «Печенганикель» в их загрязнении. Увеличение содержания меди в поверхностных слоях ДО зафиксировано также и в озерах Иля-Наутсиярви и Виртуовощьяур, расположенных в 80 и 90 км от плавильных цехов соответственно. Все финляндские озера и оставшиеся российские озера не показали загрязнения поверхностных слоев ДО.

Увеличение содержания Си в колонках ДО зафиксировано в 70–80-х годах прошлого столетия в российских озерах, расположенных как вблизи комбината (Шуонияур), так и на удалении около 100 км (Виртуовощьяур, Кочеяур). Наиболее интересными получились результаты по длинной колонке из норвежского озера Раббватнет – первое заметное увеличение содержания Си датируется серединой 17 века, что, вероятно, связано с началом индустриальной революции в европейских странах, увеличением атмосферных выбросов ТМ и их воздушной миграцией в направлении Арктики (рис. 2). Следующее увеличение содержания Си происходило в 19 веке, особенно во второй половине, что вызвано, возможно, индустриализацией в Европе, в том числе и в европейской части России. С этого времени концентрации меди все более увеличиваются, и особенно интенсивный рост ее содержания связан с началом медно-никелевого производства в Печенгском районе (в 30-е годы 20 века), а также с началом разработки железорудного месторождения Бьорневатн (в начале 20 века). Стремительный рост содержания Си в 1970–80-е годы обусловлен началом переработки норильской руды и интенсификацией медно-никелевого производства. В последние два десятилетия производство упало после распада СССР, но концентрации Си в ДО оз. Раббватнет (так же как и в российских озерах Шуонияур, Виртуовощьяур, Кочеяур) только увеличиваются, что

объясняется аккумуляцией ТМ на территории водосборов озер [Даувальтер и др., 2012].

В российских озерах (Пиккуярви, Шуонияур), расположенных ближе к источнику выбросов (комбинату «Печенганикель»), наблюдается увеличение концентраций Ni в поверхностных слоях ДО, так же как и описанное ранее повышение концентраций Cu. Все исследуемые норвежские озера Ярфьорда, испытывающие интенсивное атмосферное загрязнение выбросами плавильных цехов комбината, показывают увеличение содержания Ni в поверхностных слоях ДО. Увеличение его содержания в поверхностных 2 см ДО зафиксировано также и в других российских озерах Риуттикияуре и Виртуовощьяур, расположенных в 90 км от плавильных цехов. В отличие от ситуации с медью во всех финляндских озерах, в том числе и в Сиеррамьярви (более 130 км от комбината), отмечается увеличение содержания Ni в поверхностных 2–3 см ДО.

Увеличение содержания Ni (так же как и Cu) в колонках ДО зафиксировано в 70–80-х годах прошлого столетия в российских озерах (рис. 3), расположенных как вблизи комбината (Шуонияур), так и на удалении около 100 км (Виртуовощьяур). Заметное увеличение содержания

Ni в длинной колонке ДО норвежского озера Раббватнет датируется 17-м веком, что, вероятно, связано (как и в случае с Cu) с началом промышленной революции в европейских странах, увеличением выбросов ТМ в окружающую среду и их воздушной миграцией в направлении Арктики (см. рис. 3). Следующее увеличение содержания Ni датируется серединой 19 века, что вызвано, возможно, индустриализацией в Европе, в том числе и в европейской части России. С этого времени концентрации Ni постепенно увеличиваются. Интенсивный рост содержания Ni в начале 20 века связан с освоением медно-никелевых месторождений в Печенгском районе и железорудного месторождения Бьорневатн в Сер-Варангере, однако в середине 20 века происходит практически двукратный спад содержания Ni во время снижения производства в годы Второй мировой войны. Начало переработки норильской руды и интенсивный рост медно-никелевого производства на комбинате «Печенганикель» вызвали стремительный рост содержания Ni в 70–80-е годы 20 века. В последние два десятилетия производство упало после распада СССР, но концентрации Ni в ДО оз. Раббватнет (как и в российских озерах Шуонияур, Виртуовощьяур) только

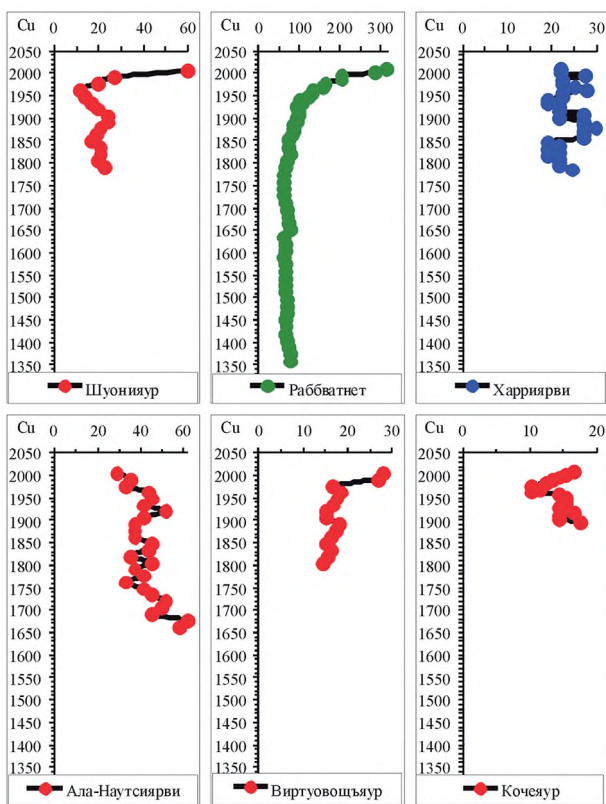


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций Cu (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

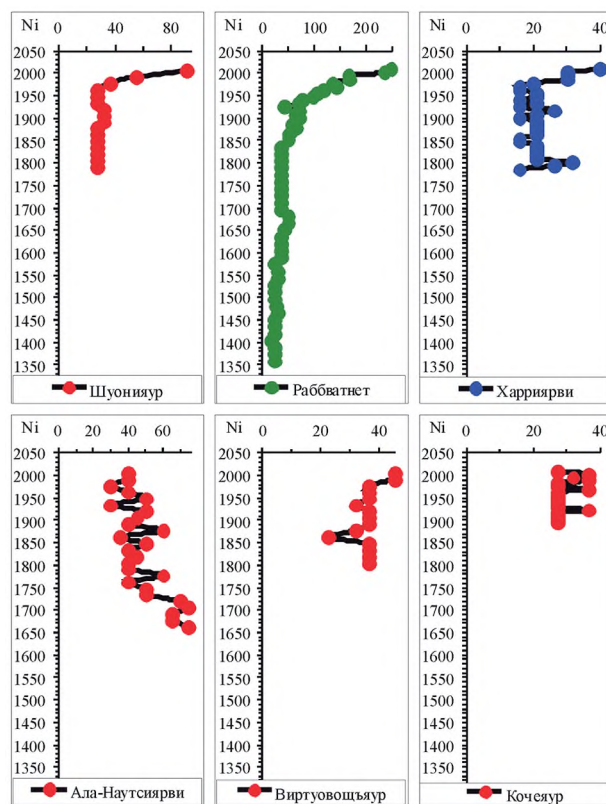


Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций Ni (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

увеличиваются, что объясняется аккумуляцией ТМ, в том числе и Ni, на территории водосборов озер [Даувальтер и др., 2012].

В вертикальном распределении содержания Co в ДО исследуемых водоемов обнаружено увеличение концентраций в поверхностных слоях всех норвежских озер, а также российских, расположенных близко к комбинату «Печенганикель» (Пиккуярви и Шуонияур). Кроме того, зафиксировано значительное повышение концентраций Co в слое 6–7 см ДО озера Лампи 222, ближе других из финляндских озер расположенного к комбинату. В остальных исследуемых водоемах проявляется тенденция уменьшения содержания Co по направлению к поверхности ДО.

В датируемой колонке ДО норвежского озера Раббватнет четко отмечается период снижения содержания Co к началу 20 века (рис. 4), после которого концентрации Co постоянно увеличивались до максимальных значений в начале 21 века, а затем к поверхности ДО содержание Co немного уменьшается. В оз. Шуонияур увеличение содержания Co датируется 70-ми годами прошлого века, когда на комбинате приступили к переработке норильской руды. Одновременное увеличение

содержания кобальта зафиксировано и в ДО оз. Виртуовощьяур.

Повышенное содержание и скорость аккумуляции Ni, Cu и Co в ДО, датированных последним столетием, в российских и норвежских озерах зафиксированы и предыдущими исследованиями [Norton et al., 1992, 1996; Rognerud et al., 1993].

В вертикальном распределении содержания Zn в ДО исследуемых озер не обнаружено увеличения концентрации в поверхностных слоях, за исключением российского озера Пиккуярви, близко расположенного к комбинату «Печенганикель» (в 5 км на запад). Зафиксировано также незначительное повышение концентрации Zn к поверхности ДО в озерах Виртуовощьяур (с начала 20 века, рис. 5) и Гардсьон, а также в приповерхностном слое 1–2 см оз. Риуттияуре.

В большей части исследуемых озер отмечается тенденция снижения содержания Zn к поверхности ДО (см. рис. 5). Вероятно, это связано с геохимическими особенностями данного ТМ, такими как довольно высокая миграционная подвижность, чуткая реакция его на изменения физико-химических условий в водоеме и на водосборе озер (в первую очередь снижение

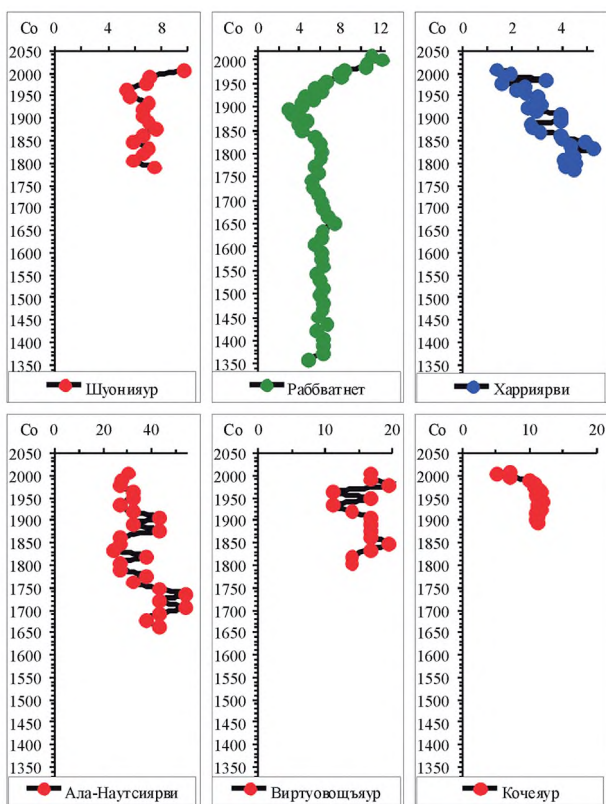


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций Co (мкг/г сухого веса) в датируемых ДО исследуемых озер

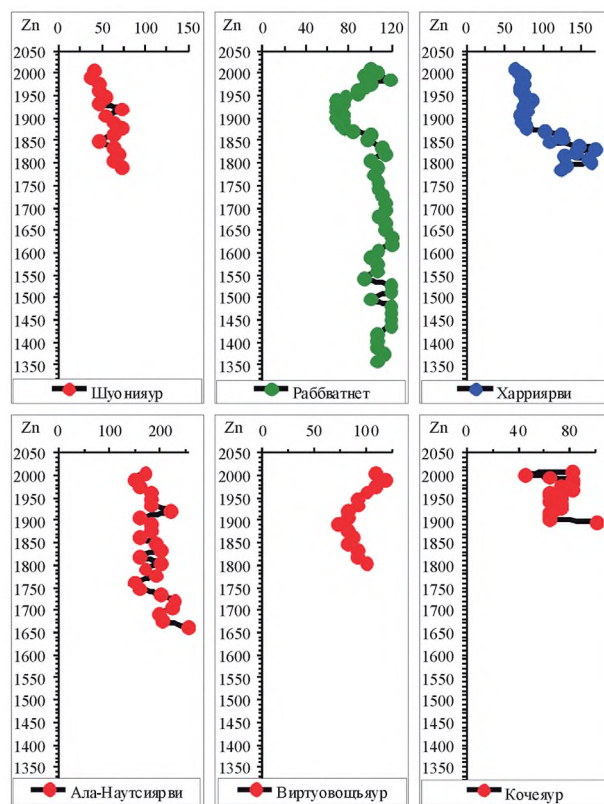


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций Zn (мкг/г сухого веса) в датируемых ДО исследуемых озер

величины pH и проявляющееся закисление), повышенная (по сравнению с другими ТМ) потребность живых организмов в этом металле и т. д.

В датированной колонке ДО норвежского озера Раббватнет четко отмечается период двукратного снижения содержания Zn в период с середины 19-го до середины 20 века (см. рис. 5), после которого концентрации его увеличились до максимальных значений в 80-х годах 20 века (по времени этот период совпадает с максимальным производством ТМ на комбинате «Печенганикель»), а затем к поверхности ДО концентрации Zn вновь уменьшаются.

Халькофильные высокотоксичные элементы Cd, Pb, As и Hg в последние десятилетия рассматриваются многими экологами как глобальные элементы-загрязнители [например, Расуна, Расуна, 2001]. В толще ДО подавляющего большинства исследуемых озер отмечается тенденция увеличения содержания Cd по направлению к их поверхности. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 5 см) более половины озер происходит снижение содержания Cd. Этот факт зафиксирован в финляндских и норвежских озерах, а также в российских, наиболее удаленных от металлургического производства. В озерах Пиккуярви, Иля-Наутсиярви

и Дурватн происходит постепенное увеличение концентраций Cd, и максимальное содержание отмечается в поверхностном слое.

Заметный рост концентраций Cd в датированных ДО исследуемых озер зафиксирован в начале 20 века (рис. 6), но особенное увеличение его содержания в середине прошлого века связано с интенсивным развитием промышленности в целом после Второй мировой войны (в озерах, удаленных от основного источника загрязнения комбината «Печенганикель» на сто километров, – Кочеяур и Виртуовощьяур) и возобновлением металлургического производства на комбинате (в озерах, находящихся в зоне влияния воздушных выбросов, – Раббватнет). Снижение содержания Cd в поверхностном слое датированных ДО зафиксировано во всех исследуемых озерах и относится к одному-двум десятилетиям, что может быть связано как со снижением производства ТМ после распада СССР, так и со снижением глобально-го выброса кадмия в последние десятилетия.

Во всех без исключения исследуемых озерах отмечается увеличение содержания Pb по направлению к поверхности ДО, вне зависимости от того, расположены озера вблизи точечных источников загрязнения или находятся

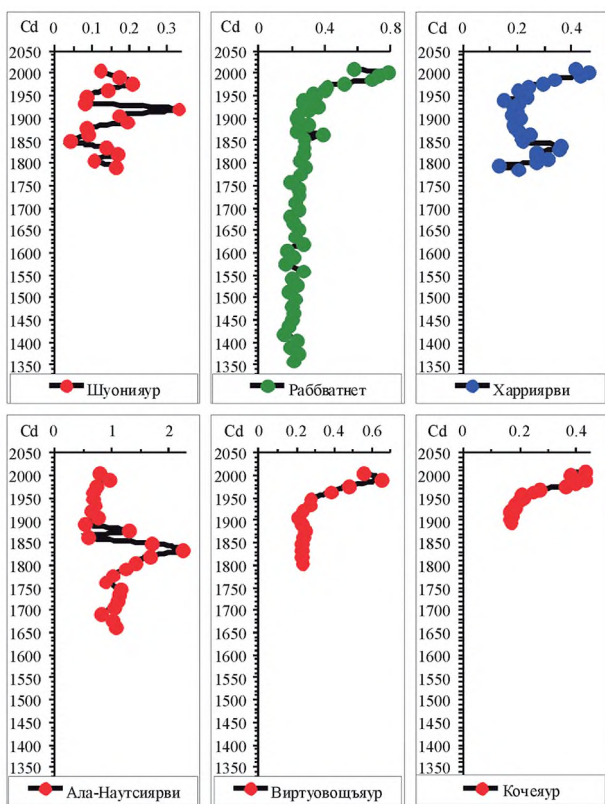


Рис. 6. Вертикальное распределение концентраций Cd (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

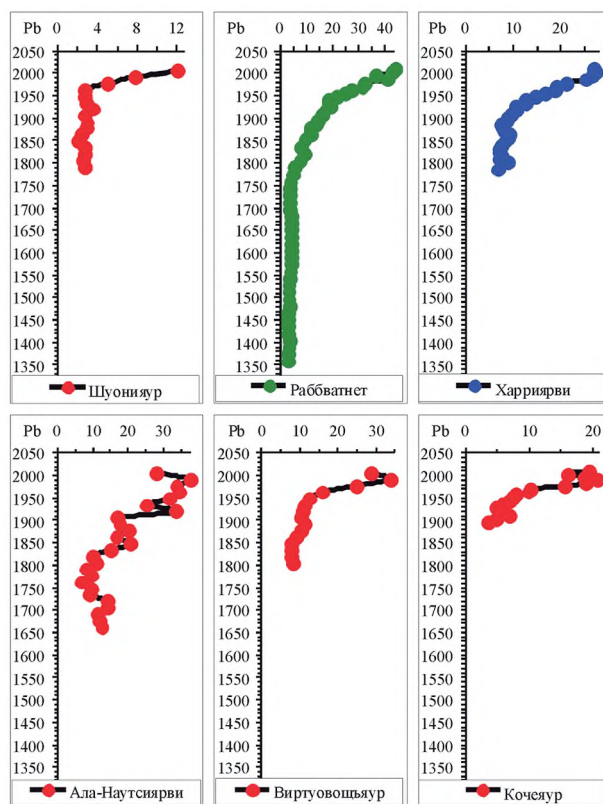


Рис. 7. Вертикальное распределение концентраций Pb (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

на значительном удалении от них. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 3 см) половины озер происходит снижение содержания Pb. Этот факт зафиксирован в финляндских и норвежских водоемах, а также в российских, наиболее удаленных от металлургического производства. В других озерах происходит постепенное увеличение концентраций Pb, и максимальные содержания отмечаются в поверхностном слое.

Заметный рост концентрации Pb в датированных ДО оз. Раббатнет зафиксирован в середине 18 века (рис. 7), что может быть связано с развитием индустриальной революции в европейских странах. С этого времени происходит постоянное увеличение содержания свинца вследствие усиления металлургического производства. Особенно заметное увеличение содержания Pb в ДО всех датированных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Второй мировой войны, в том числе с усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства в регионе. Снижение содержания Pb в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве

исследуемых озер и датируется одним-двумя десятилетиями, что может быть связано как со снижением производства ТМ после распада СССР, так и со снижением глобального выброса свинца в последние десятилетия. Возможно, основной причиной снижения его содержания в последние годы является запрещение использования этилированного бензина вначале в европейских странах, а затем и в России.

Увеличение содержания Pb в ДО исследуемых озер датируется временем, слишком ранним, чтобы быть связанным с индустриальной деятельностью в этом регионе. Имеются данные по ДО озер южной части Швеции об атмосферном загрязнении Pb в результате его интенсивного производства и использования в Европе начиная со времен древнегреческой и древнеримской цивилизаций [Renberg et al., 1994]. Отмечено, что атмосферные выпадения Pb увеличились по сравнению с фоновыми значениями более чем 2600 лет назад (на глубине ДО от 1,5 до 4 м). Существует незначительное, но заметное увеличение осадения Pb около 2000 лет назад, более существенное увеличение началось примерно 1000 лет назад, ускоренная аккумуляция стала происходить в 19-м и особенно в 20 веке. Максимальная аккумуляция приходится на 1970-е годы.

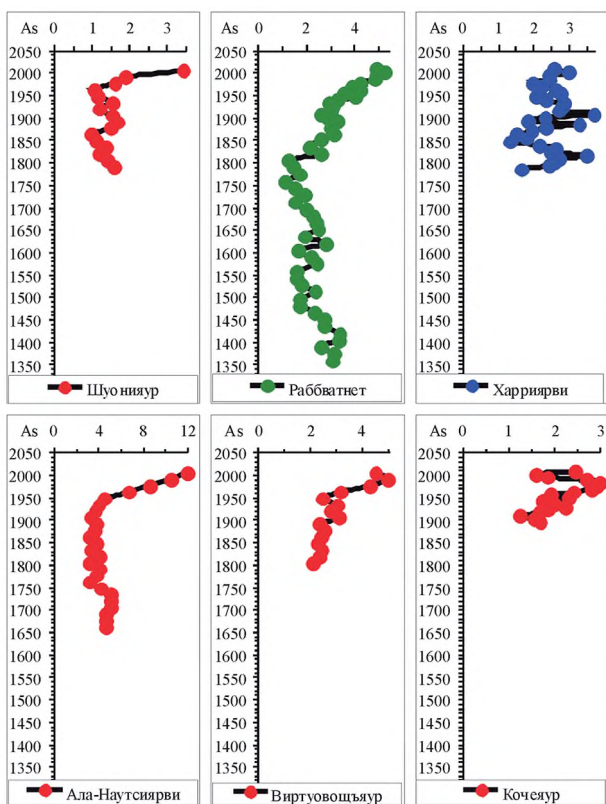


Рис. 8. Вертикальное распределение концентраций As (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

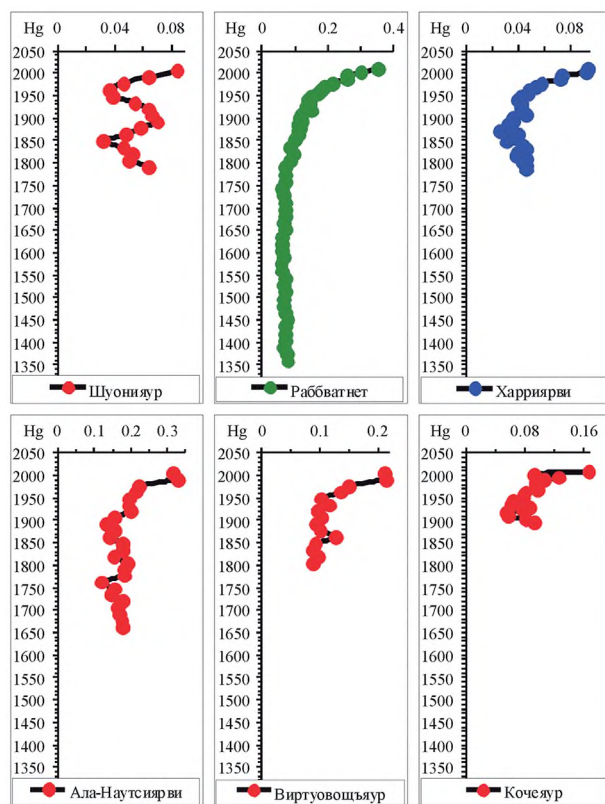


Рис. 9. Вертикальное распределение концентраций Hg (мкг/г сухого веса) в датированных ДО исследуемых озер

До индустриализации 19 в. концентрации свинца в ДО озер южной части Швеции уже увеличились в результате атмосферных выпадений в 10–30 раз по сравнению с фоновым уровнем. Фоновые концентрации Pb (на глубине ДО более 1 м) в 19 шведских озерах находились в пределах от 2 до 15 мкг/г (сух. веса), но обычно были менее 10 мкг/г [Renberg et al., 1994]. Эти значения совпадают с нашими исследованиями фоновых значений. В Северной Америке скорость аккумуляции Pb в ДО озер увеличивается последовательно с 1850–70-х до 1980-х годов и затем уменьшается до настоящего времени [Norton et al., 1990]. В Европе увеличение подобно вышеописанному, но резкое увеличение начинается на 50–70 лет раньше. Свинец антропогенного происхождения имеет много источников, включая металлургию, стекольные заводы и использование тетраэтила Pb как антидетонационной добавки к бензину. Прекращение использования последнего вызвало снижение объема выпадений Pb в Северной Америке и Европе. Увеличение его концентраций может быть связано с трансграничным переносом Pb из источников в Северной Америке и южных регионах Европы. Аккумуляция Pb в ДО озер северных регионов Норвегии меньше, чем южных [Norton, Hess, 1980] или юга Северной Америки [Norton et al., 1990].

Отмечается увеличение содержания As по направлению к поверхности ДО подавляющего большинства исследуемых водоемов, за исключением двух озер – Харриярви и Тоартесьяур. Максимальное содержание элемента зафиксировано в поверхностном слое колонок ДО большинства озер – всех норвежских, российских, расположенных ближе к комбинату, а также финляндских озер Сиеррамъярви и Лампи 222. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 3 см) четырех озер, как правило, более удаленных от точечного источника загрязнения (комбината «Печенганикель»), происходит снижение содержания As, что может говорить о последствии снижения глобального выброса этого опасного для окружающей среды халькофильного элемента.

В датированных ДО оз. Раббватнет заметный рост концентраций As зафиксирован в начале 19 века (рис. 8), что может быть связано с развитием промышленности в европейских странах. До этого времени зафиксировано постоянное снижение содержания As с самых глубоких слоев ДО, начиная с 14 века. В течение 19 и 20 столетий происходит постоянное увеличение содержания данного элемента вследствие повышения промышленного производства, в том числе и As. Особенно заметное увеличение его содержания в ДО всех

датированных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности после Второй мировой войны, возрастающим использованием As в металлургии и возобновлением металлургического производства на комбинате. Снижение содержания As в поверхностном слое ДО некоторых исследуемых озер датируется одним-двумя десятилетиями. Это может быть связано как со снижением металлургического производства после распада СССР, так и с уменьшением глобального выброса As в последние десятилетия. Возможно, причиной снижения содержания As в последние десятилетия является запрещение его использования в европейских странах, в том числе и в России, в медицинских целях, главным образом в стоматологии.

Увеличение содержания Hg по направлению к поверхности ДО отмечается во всех исследуемых озерах, за исключением оз. Тоартесьяур. Максимальное содержание Hg зафиксировано в поверхностном слое ДО большинства озер – всех норвежских озер, российских озер Кочезяур и Иля-Наутсиярви, расположенных дальше от комбината, а также финляндских озер Харриярви и Лампи 222. В то же время в самом верхнем слое ДО (от 1 до 3 см) шести озер происходит уменьшение содержания Hg, что может говорить о последствии снижения глобального выброса этого очень опасного для окружающей среды халькофильного элемента.

Заметный рост концентрации Hg в датированных ДО оз. Раббватнет зафиксирован, так же как и As, в начале 19 века (рис. 9), что может быть связано с развитием индустриальной революции в европейских странах. До этого времени зафиксировано довольно стабильное содержание Hg (0,06–0,08 мкг/г). В течение 19 и 20 столетий происходит постоянное увеличение содержания вследствие повышения промышленного производства, в том числе и Hg, применения соединений Hg в различных целях – в медицине, в технике, в сельском хозяйстве при производстве пестицидов. Особенно заметное увеличение содержания Hg в ДО всех датированных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Второй мировой войны, с усиливающимся сжиганием топлива – в первую очередь угля, который содержит относительно высокие концентрации Hg, – в металлургии, с возобновлением металлургического производства в регионе. Снижение содержания Hg в поверхностном слое ДО некоторых исследуемых озер датируется одним-двумя десятилетиями. Это может быть связано со снижением металлургического

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции (r) между концентрациями ТМ и глубины слоя ДО в оз. Раббватнет

	Слой	Cu	Ni	Co	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Слой	1,00								
Cu	-0,60	1,00							
Ni	-0,70	0,98	1,00						
Co	-0,20	0,78	0,75	1,00					
Zn	0,61	-0,17	-0,24	0,33	1,00				
Cd	-0,63	0,90	0,90	0,75	-0,11	1,00			
Pb	-0,78	0,93	0,96	0,65	-0,38	0,90	1,00		
As	-0,49	0,82	0,81	0,57	-0,30	0,78	0,85	1,00	
Hg	-0,71	0,97	0,97	0,69	-0,32	0,91	0,98	0,85	1,00

Примечание. Корреляционная связь достоверно устанавливается при $r > 0,35$ ($p < 0,01$) при выборке $n = 53$.

производства после распада СССР, уменьшением глобального выброса Hg вследствие понимания чрезвычайно высокой опасности этого металла. Возможно, причиной снижения содержания Hg в последние десятилетия является утилизация бытовой техники, содержащей Hg, в первую очередь ртутьсодержащих ламп.

С целью выявления общих закономерностей распределения ТМ в ДО исследуемых озер был проведен корреляционный анализ результатов исследования оз. Раббватнет (табл. 2), по которому, как уже было сказано, отобрана самая длинная колонка ДО и имеется наибольший массив данных. Озеро расположено в 30 км в направлении преобладающих ветров от основных производственных площадок (плавильные цеха, цеха обжига руды и получения файнштейна) комбината «Печенганикель». Трансграничные переносы воздушных масс из стран Западной Европы также оказывают непосредственное влияние на формирование химического состава ДО озера. В толще ДО оз. Раббватнет наблюдается увеличение концентраций по направлению к поверхности ДО всех исследованных металлов, что отражено в высоких отрицательных значениях коэффициента корреляции содержания металлов с глубиной слоя ДО. Исключение составляет Zn, для которого отмечены отрицательные, довольно низкие, величины коэффициента корреляции с другими ТМ. Высокие значения коэффициентов корреляции зафиксированы между Ni, Cu и Co, главным источником поступления которых являются атмосферные выбросы комбината «Печенганикель». Вышеназванные металлы коррелируют также с халькофильными металлами Cd, Pb, As, Hg, поступление которых связано с глобальным загрязнением и атмосферными выбросами этих элементов из многочисленных источников загрязнения.

Выводы

Средние скорости осадконакопления в исследуемых озерах приграничной территории

между Россией, Норвегией и Финляндией довольно постоянны и находятся в пределах 0,7–1,6 мм/год. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в ДО озер обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920–30-ми годами, а максимальный рост зафиксирован в 70–80-е годы прошлого столетия, во время максимального производства и наибольших атмосферных выбросов ТМ. Заметный рост концентраций Pb в ДО зафиксирован в начале 18 века, что, вероятно, связано с индустриальной революцией в европейских странах, увеличением атмосферных выбросов в окружающую среду и воздушной миграцией в направлении Арктики. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных загрязнителей. Особенно это характерно для финляндских озер. Заметное увеличение содержания исследуемых ТМ, за исключением Zn, произошло в середине прошлого века, что связано с интенсивным развитием промышленности после Второй мировой войны, все усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства в регионе. Снижение содержания халькофильных элементов (Cd, Pb, As) в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер и датируется одним-двумя последними десятилетиями. Вероятно, это связано с уменьшением выбросов и осознанием высокой опасности этих токсичных элементов.

Литература

- Барышев И. А. Формирование зообентоса пороговых участков рек северо-западной части Мурманской области в зоне повышенных концентраций тяжелых металлов // Труды КарНЦ РАН. 2010. № 1. С. 105–112.
- Даувальтер В. А. Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер Кольского полуострова как индикатор загрязнения водных экосистем // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных

объектов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 24–35.

Даувальтер В. А. Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами // Геоэкология. 1997. № 6. С. 43–53.

Даувальтер В. А. Тяжелые металлы в донных отложениях озерно-речной системы озеро Инари – река Пасвик // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 494–500.

Даувальтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской субарктики (природоохранные аспекты проблемы): автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 52 с.

Даувальтер В. А. Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия географическая. 2002, № 4. С. 65–73.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Мурманский гос. техн. ун-т, 2012. 242 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных Субарктических и Арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды Кольского НЦ РАН. Прикладная экология Севера. 2012. Вып. 1, № 2 (9). С. 54–87.

Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А. и др. Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. I. 226 с. Ч. II. 262 с.

Крючков В. В., Макарова Т. Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: КНЦ, 1989. 96 с.

Åjräs M., de Cariat P., Chekushin V. A. et al. Ecological investigation, Kola Peninsula: sulfur and trace element contents in snow // Water, Air, Soil Pollut. 1995. Vol. 85. P. 749–754.

Åjräs M., Pavlov V. A., Reimann C. Comparison of sulfur and heavy metal contents and their regional distribution in humus and moss samples from vicinity of Nikel and Zapoljarnij, Kola Peninsula, Russia // Water, Air, Soil Pollut. 1997. Vol. 98. P. 361–380.

Appleby P. G., Oldfield F. The calculation of the ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to sediments // Catena. 1978. Vol. 5. P. 1–8.

de Cariat P., Reimann C., Åjräs M. et al. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 1. Element levels and sources // Appl. Geochem. 1996a. Vol. 2. P. 149–168.

de Cariat P., Reimann C., Åjräs M. et al. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 2. Time-series // Appl. Geochem. 1996b. Vol. 2. P. 169–184.

Carignan R., Tessier A. Zinc deposition in acid lakes: the role of diffusion // Science. 1985. Vol. 228. P. 1524–1526.

Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finnish Border Area in Northern

Fennoscandia // Working Paper of the Finnish Forest Research Institute. Eds. J. Derome, T. Myking, P. A. Aarstad. 2008. Vol. 85. 98 p.

Dauvalter V. Concentrations of heavy metals in superficial lake sediments of Pechenga district, Murmansk region, Russia // Vatten. 1992. Vol. 48, No. 2. P. 141–145.

Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola Peninsula, Russia // Sci. Tot. Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61.

Dauvalter V. A. Heavy metals in the bottom sediments of the Inari-Pasvik lake-river system // Water Resources. 1998. Vol. 25, No. 4. P. 451–457.

Dauvalter V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjarvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monitor. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215.

Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, No 1. P. 9–18.

Dauvalter V., Sandimirov S. Pollution of the Sediments of the Paz River basin / Eds. Stebel K., Chritin-sen G., Derome J., Grekela I. State of the environment in the Norwegian, Finnish and Russian border area. The Finnish Environment. 2007. No. 6. 55 p.

Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S. et al. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // J. Environ. Sci. Health, 2011. Part A. Vol. 46, iss 9. P. 1020–1033.

Gregurek D., Melcher F., Pavlov V. A. et al. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia // Miner. Petrol. 1999. Vol. 65. P. 87–111.

Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S. et al. Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area. Jyvaskyla, Finland: Kopijyva Oy, 2008. 313 p.

Lukin A., Dauvalter V., Kashulin N. et al. Assessment of copper-nickel industry impact on a subarctic lake ecosystem // Sci. Tot. Environ. 2003. Vol. 306. P. 73–83.

Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Rodyushkin I. V. et al. Airborne contaminants by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia) // Sci. Tot. Environ. 1995. Vol. 160–161. P. 715–727.

Norton S. A., Hess C. T. Atmospheric deposition in Norway during the last 300 years as recorded in SNSF lake sediments: I. Sediment dating and chemical stratigraphy // Proc. Intern. Ecol. Impact of Acidic Precipitation, SNSF-project, Sandefjorden, Norway, 1980. P. 274–275.

Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. et al. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments (Eds. S. E. Lindberg et al). Sources, Deposition and Capony Interactions. Acidic Precipitation. New York: Springer-Verlag, 1990. Vol. III. P. 73–101.

Norton S. A., Henriksen A., Appleby P. G. et al. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.

Norton S. A., Appleby P. G., Dauvalter V., Traaen T. S. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by

studies of lake sediment // NIVA-Report 41/1996, Oslo, 1996. 18 p.

Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace elements to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // *Environ. Rev.* 2001. Vol. 4. P. 269–298.

Reimann C., Banks D., Bogatyrev I. et al. Lake water geochemistry on the western Kola Peninsula, north-west Russia // *Appl. Geochem.* 1999. Vol. 14. P. 787–805.

Renberg I., Persson M. W., Emteryd O. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments // *Nature.* 1994. Vol. 368. P. 323–326.

Rognerud S. Sedimentundersøkelser i Pasvikela høsten 1989. Oslo: NIVA-Rapport 401/90, 1990. 10 p.

Rognerud S., Norton S. A., Dauvalter V. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/93, 1993. 18 p.

Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway // *AMBIO.* 1993. Vol. 22, No 4. P. 206–212.

Rognerud S., Skotvold T., Fjeld E. et al. Concentrations of trace elements in recent and preindustrial sediments from Norwegian and Russian Arctic lakes // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1998. Vol. 55. P. 1512–1523.

Rognerud S., Dauvalter V. A., Fjeld E. et al. Spatial Trends of Trace-Element Contamination in Recently Deposited Lake Sediment Around the Ni–Cu Smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic // *AMBIO.* 2013. Vol. 42, No. 6. P. 724–736.

Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As- NLH, Nr. 2, 1979. 7 p.

Traaen T. S., Moiseenko T., Dauvalter V. et al. Acidification of surface waters, nickel and copper in water and lake sediments in the Russian-Norwegian border areas. Working Group for Water and Environmental Problems under the Norwegian-Soviet Environmental Protection Commission. Oslo and Apatity, 1991. 20 p.

Поступила в редакцию 15.12.2014

References

Baryshev I. A. Formirovanie zoobentosa porogovykh uchastkov rek severo-zapadnoi chasti Murmanskoi oblasti v zone povyshennykh kontsentratsii tyazhelykh metallov [Formation of zoobenthos in river rapids in the North-West of the Murmansk region under heavy metal impact]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of KarRC RAS]*. 2010. No 1. P. 105–112.

Dauval'ter V. A. Kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozer Kol'skogo poluoostrova kak indikator zagryazneniya vodnykh ekosistem [Heavy metal concentration in lake sediments of the Kola Peninsula as an indicator of aquatic ecosystems pollution]. *Problemy khimicheskogo i biologicheskogo monitoringa ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ob'ektov Kol'skogo Severa [Problems of chemical, biological and ecological state of water bodies of the Kola North]*. Apatity: KNTs RAN, 1995. P. 24–35.

Dauval'ter V. A. Zagryaznenie donnykh otlozhenii vodobora reki Pasvik tyazhelymi metallami [Heavy metal pollution in sediments of the Pasvik River drainage]. *Geoekologiya.* 1997. No 6. P. 43–53.

Dauval'ter V. A. Tyazhelye metally v donnykh otlozheniyakh ozerno-rechnoi sistemy ozero Inari – reka Pasvik [Heavy metals in the bottom sediments of the Inari-Pasvik lake-river system]. *Vod. Resursy [Water resources]*. 1998. Vol. 25, No 4. P. 494–500.

Dauval'ter V. A. Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodnykh ob'ektakh Evropeiskoi subarktiki (prirodokhrannye aspekty problemy) [Sedimentation patterns in water bodies of European Subarctic (environmental aspects)]: avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk [PhD Diss. (Geogr.)]. Apatity: KNTs RAN, 1999. 52 p.

Dauval'ter V. A. Khimicheskii sostav donnykh otlozhenii subarkticheskogo ozera pod vliyaniem gornoi metallurgii [Chemical composition of subarctic lake sediments under impact of mining and metallurgy]. *Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya [Transactions of the Academy of Sciences. Geographical series]* 2002, No 4. P. 65–73.

Dauval'ter V. A. Geoekologiya donnykh otlozhenii ozer [Geocology of lake bottom sediments]. Murmansk: Murmanskii gos. tekhn. un-t, 2012. 242 p.

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A., Sandimirov S. S. Tendentsii izmenenii khimicheskogo sostava donnykh otlozhenii presnovodnykh Subarkticheskikh i Arkticheskikh vodoemov pod vliyaniem prirodnykh i antropogennykh faktorov [Trends in the dynamics of chemical composition of sediments in freshwater Subarctic and Arctic reservoirs under natural and anthropogenic factors]. *Trudy Kol'skogo NTs RAN. Prikladnaya ekologiya Severa [Transactions of Kola SC RAS. Applied ecology of the North]*. 2012. Iss. 1, No 2 (9). P. 54–87.

Kashulin N. A., Sandimirov S. S., Dauval'ter V. A., Terent'ev P. M., Denisov D. B. Ekologicheskii katalog ozer Murmanskoi oblasti [Ecological catalogue of lakes in the Murmansk region]. Severo-zapadnaya chast' Murmanskoi oblasti i prigranichnoi territorii sopredel'nykh stran [North-West of the Murmansk region and border areas of adjacent states]. Apatity: KNTs RAN, 2009. Part. I. 226 p. Part. II. 262 p.

Kryuchkov V. V., Makarova T. D. Aerotekhnogennoe vozdeistvie na ekosistemy Kol'skogo Severa [Aerotechnogenic impact on ecosystems of the Kola North]. Apatity: KNTs, 1989. 96 p.

Äjräs M., Cariat P. de, Chekushin V. A., Niska-vaara H., Reimann C. Ecological investigation, Kola Peninsula: sulfur and trace element contents in snow. *Water, Air, Soil Pollut.* 1995. Vol. 85. P. 749–754.

Äjräs M., Pavlov V. A., Reimann C. Comparison of sulfur and heavy metal contents and their regional distribution in humus and moss samples from vicinity of Nikel and Zapoljarnij, Kola Peninsula, Russia. *Water, Air, Soil Pollut.* 1997. Vol. 98. P. 361–380.

Appleby P. G., Oldfield F. The calculation of the ²¹⁰Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to sediments. *Catena.* 1978. Vol. 5. P. 1–8.

- Cariat P. de, Reimann C., Åjräs M., Niskavaara H., Chekushin V. A., Pavlov V. A. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 1. Element levels and sources. *Appl. Geochem.* 1996a. Vol. 2. P. 149–168.
- Cariat P. de, Reimann C., Åjräs M., Niskavaara H., Chekushin V. A., Pavlov V. A. Stream water geochemistry from selected catchments on the western Kola Peninsula (NW Russia) and neighbouring areas of Finland and Norway: 2. Time-series. *Appl. Geochem.* 1996b. Vol. 2. P. 169–184.
- Carignan R., Tessier A. Zinc deposition in acid lakes: the role of diffusion. *Science.* 1985. Vol. 228. P. 1524–1526.
- Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finnish Border Area in Northern Fennoscandia. Working Paper of the Finnish Forest Research Institute. Eds. J. Derome, T. Myking, P. A. Aarstad. 2008. Vol. 85. 98 p.
- Dauvalter V. Concentrations of heavy metals in superficial lake sediments of Pechenga district, Murmansk region, Russia. *Vatten.* 1992. Vol. 48, No. 2. P. 141–145.
- Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia. *Sci. Tot. Environ.* 1994. Vol. 158. P. 51–61.
- Dauvalter V. A. Heavy metals in the bottom sediments of the Inari-Pasvik lake-river system. *Water Resources.* 1998. Vol. 25, No. 4. P. 451–457.
- Dauvalter V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjarvi, Murmansk region, Russia. *J. Environ. Monitor.* 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215.
- Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage. *Chemosphere.* 2001. Vol. 42, No 1. P. 9–18.
- Dauvalter V., Sandimirov S. Pollution of the Sediments of the Paz River basin. Eds. Stebel K., Chritinsen G., Derome J., Grekela I. State of the environment in the Norwegian, Finnish and Russian border area. *The Finnish Environment.* 2007. No 6. 55 p.
- Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P. A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse. *J. Environ. Sci. Health.* 2011. Part A, vol. 46, iss 9. P. 1020–1033.
- Gregurek D., Melcher F., Pavlov V. A., Reimann C., Stumpf E. F. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia. *Miner. Petrol.* 1999. Vol. 65. P. 87–111.
- Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Terentjev P. M., Koroleva I. M. Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area. Jyvaskyla, Finland: Kopijyva Oy, 2008. 313 p.
- Lukin A., Dauvalter V., Kashulin N., Yakovlev V., Sharov A., Vandysh O. Assessment of copper-nickel industry impact on a subarctic lake ecosystem. *Sci. Tot. Environ.* 2003. Vol. 306. P. 73–83.
- Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Rodyushkin I. V., Dauvalter V. A., Lukin A. A. and Kashulin N. A. Airborne contaminants by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia). *Sci. Tot. Environ.* 1995. Vol. 160–161. P. 715–727.
- Norton S. A., Hess C. T. Atmospheric deposition in Norway during the last 300 years as recorded in SNSF lake sediments: I. Sediment dating and chemical stratigraphy. Proc. Intern. Ecol. Impact of Acidic Precipitation, SNSF-project, Sandefjorden, Norway, 1980. P. 274–275.
- Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D., Mierle G., Kahl J. S. The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments. Eds. S. E. Lindberg et al. Sources, Deposition and Cation Interactions. Acidic Precipitation. New York: Springer-Verlag, 1990. Vol. III. P. 73–101.
- Norton S. A., Henriksen A., Appleby P. G. et al. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.
- Norton S. A., Appleby P. G., Dauvalter V., Traaen T. S. Trace metal pollution in eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment. NIVA-Report 41/1996, Oslo, 1996. 18 p.
- Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace elements to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environ. Rev.* 2001. Vol. 4. P. 269–298.
- Reimann C., Banks D., Bogatyrev I., de Cariat P., Kashulina G., Niskavaara H. Lake water geochemistry on the western Kola Peninsula, north-west Russia. *Appl. Geochem.* 1999. Vol. 14. P. 787–805.
- Renberg I., Persson M. W., Emteryd O. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments. *Nature.* 1994. Vol. 368. P. 323–326.
- Rognerud S. Sedimentundersøkelser i Pasvikela høsten 1989. Oslo: NIVA-Rapport 401/90, 1990. 10 p.
- Rognerud S., Norton S. A., Dauvalter V. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/93, 1993. 18 p.
- Rognerud S., Fjeld E. Regional survey of heavy metals in lake sediments in Norway. *AMBIO.* 1993. Vol. 22, No 4. P. 206–212.
- Rognerud S., Skotvold T., Fjeld E., Norton S. A., Hobak A. Concentrations of trace elements in recent and preindustrial sediments from Norwegian and Russian Arctic lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1998. Vol. 55. P. 1512–1523.
- Rognerud S., Dauvalter V. A., Fjeld E., Skjelkvåle B. L., Christensen G., Kashulin N. Spatial Trends of Trace-Element Contamination in Recently Deposited Lake Sediment Around the Ni-Cu Smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic. *AMBIO.* 2013. Vol. 42, No 6. P. 724–736.
- Skogheim O. K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo: As- NLH, 1979. No 2. 7 p.
- Traaen T. S., Moiseenko T., Dauvalter V., Rognerud S., Henriksen A., Kudravseva L. Acidification of surface waters, nickel and copper in water and lake sediments in the Russian-Norwegian border areas. Working Group for Water and Environmental Problems under the Norwegian-Soviet Environmental Protection Commission. Oslo and Apatity, 1991. 20 p.

Received December 15, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

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(8155)579774

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(8155)579378

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
e-mail: denisow@inep.ksc.ru
тел.: +7(8155)579776

CONTRIBUTORS:

Dauvalter, Vladimir

Institute of North Industrial Ecology Problems
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, INEP, 184209 Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: vladimir@inep.ksc.ru
tel.: +7(8155)579774

Kashulin, Nikolai

Institute of North Industrial Ecology Problems
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, INEP, 184209 Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: nikolay@inep.ksc.ru
tel.: +7(8155)579378

Denisov, Dmitry

Institute of North Industrial Ecology Problems
Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences
14a Akademgorodok, INEP, 184209 Apatity,
Murmansk Region, Russia
e-mail: denisow@inep.ksc.ru
tel.: +7(8155)579776

УДК 581.526.325

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕР КАЗАХСТАНА

Г. Т. Фрумин, Ю. В. Крашановская

Российский государственный гидрометеорологический университет

Разработана методика прогнозирования трофического статуса озер по данным мониторинга в зимний период. Методика базируется на подходе А. Г. Волохонского, согласно которому значения минимальных энергетических затрат, вычисленных для виртуальной модели процесса вовлечения элементов минерального питания в клетки фитопланктона, являются универсальными критериями обеспеченности фитопланктона этими элементами. Выявлена статистически значимая однопараметрическая линейная зависимость между средними за год концентрациями фосфора общего ($P_{\text{общ}}$) и значениями минимальных энергетических затрат (E_p), характеризующими содержание фосфора минерального в феврале. Разработана классификация трофического статуса озер Казахстана в зависимости от значений минимальных энергетических затрат фосфора минерального в феврале.

Ключевые слова: озера Казахстана; евтрофирование; минимальные энергетические затраты; фосфор минеральный; фосфор общий; прогнозирование.

G. T. Frumin, Y. V. Krashanovskaya. PREDICTING THE TROPHIC STATUS OF SOME LAKES OF KAZAKHSTAN

A method for predicting the lake trophic status relying on wintertime monitoring data was developed. The technique is based on A. G. Volokhonskii's approach, according to which the values of the minimum energy costs calculated for the virtual model of the process of involving mineral nutrients in phytoplankton cells are universal criteria of these nutrients' availability to phytoplankton. Statistically significant one-parameter linear dependence between the average annual concentration of total phosphorus (P_t) and the values of minimum energy costs (E_p), which characterize mineral phosphorus levels in February, was detected. A classification of the trophic status of lakes of Kazakhstan depending on the values of the minimum energy costs of mineral phosphorus in February was developed.

Keywords: lakes of Kazakhstan; eutrophication; minimum energy costs; mineral phosphorus; total phosphorus; forecasting.

Согласно Водному кодексу Республики Казахстан (с изменениями и дополнениями по состоянию на 29.12.2014 г.), «Государственный мониторинг водных объектов представляет собой систему регулярных наблюдений за гидрологическими, гидрогеологическими,

гидрогеохимическими, санитарно-химическими, микробиологическими, паразитологическими, радиологическими и токсикологическими показателями их состояния, сбор, обработку и передачу полученной информации в целях своевременного выявления негативных

процессов, оценки и прогнозирования их развития, выработку рекомендаций по предотвращению вредных последствий и определению степени эффективности осуществляемых водохозяйственных мероприятий».

Следует отметить, что, как правило, на практике реализуются только две составляющие мониторинга (наблюдения и оценка).

Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема евтрофирования [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990] (синонимы: евтрофикация, эвтрофирование, эвтрофикация). Согласно ГОСТу 17.1.1.01–77, «евтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». Международная организация по стандартизации предлагает иное определение: обогащение воды биогенными веществами, особенно азотом и фосфором, что ускоряет рост водорослей и высших форм растительной жизни.

Поскольку евтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО проводятся работы по мониторингу внутренних вод, контролю за евтрофированием водоемов земного шара.

В связи с изложенным цель данного исследования заключалась в разработке методики прогнозирования трофического статуса озер по данным мониторинга в зимний период.

Материалы и методы исследования

Разработанная методика базируется на подходе А. Г. Волохонского, согласно которому значения минимальных энергетических затрат, вычисленных для виртуальной модели процесса вовлечения элементов минерального питания в клетки фитопланктона, являются универсальными критериями обеспеченности фитопланктона этими элементами [Волохонский, 1973].

На основании достаточно строгого термодинамического (энтропийного) анализа А. Г. Волохонским получено следующее выражение для расчета энергетической меры обеспеченности фитопланктона одним из элементов минерального питания (для элемента, находящегося в первом минимуме):

$$E_i = -1,34 \times \lg \beta_s \quad (1)$$

Величина E_i (ккал/моль) выражает количество энергии, необходимое для организации 1 моля элемента. Эта величина зависит не только от отношения концентраций

элемента в клетке и в среде, но и от содержания в среде других более или менее дефицитных элементов.

Величина β_s рассчитывается из следующего выражения:

$$\beta_s = C_{кл} / C_o \quad (2)$$

где $C_{кл}$ – концентрация элемента в клетке; C_o – концентрация элемента в среде.

Эти величины количественно характеризуют наличие соответствующего элемента в среде по отношению к клеткам фитопланктона определенного состава и могут служить мерой обеспеченности. Если $\beta_s < 1$, данный элемент находится в среде заведомо в избытке. Так как β для водорода и кислорода всегда меньше 1, эти элементы из рассмотрения исключены. Тот элемент, для которого β_s наибольшее, является наиболее дефицитным (первый минимум).

Для практических расчетов на основании данных А. П. Виноградова был принят следующий средний состав клеток: вода – 82 %, зола – 11 % сухого веса; состав органического вещества: углеводы – 54 %, липиды – 10 %, белки – 36 %, что соответствует $C_c = 8 \times 10^4$ мг/л; $C_n = 1 \times 10^4$ мг/л; $C_p = 1 \times 10^3$ мг/л [Волохонский, 1973].

Величина E имеет смысл количественного критерия обеспеченности любыми элементами минерального питания фитопланктона любых сред – как природных, так и синтетических. В первом случае (водоемы) критерий E должен увязываться с характеристикой трофического статуса. Решающее значение для природных сред имеют критерии обеспеченности основными элементами минерального питания – углеродом, азотом и фосфором. Причем за исходные концентрации в расчетах следует принимать содержание этих элементов в период максимального развития минерализации органического вещества в водоеме (период с января по март).

В работе [Фруммин, Хуан, 2013] подход А. Г. Волохонского был использован для оценки трофического статуса акваторий Псковско-Чудского озера и озера Тайху, расположенного в Китае.

Для оценки трофического статуса озер была использована классификация, разработанная OECD [Galvez-Cloutie, Sanchez, 2007] (табл. 1).

Первичные данные для анализа были заимствованы из ежегодников химической лаборатории государственного предприятия «Центр гидрометеорологического мониторинга» РГП Казгидромет, входящего в состав Министерства экологии и охраны окружающей среды Республики Казахстан (табл. 2). В этой

Таблица 1. Классификация трофического статуса озер по среднему за год содержанию фосфора общего

Трофический статус	Концентрация фосфора общего, мкг/л	Трофический статус	Концентрация фосфора общего, мкг/л
Ультраолиготрофный	<4	Евтрофный	35–100
Олиготрофный	<10	Гипертрофный	>100
Мезотрофный	10–35	-	-

Таблица 2. Распределение концентраций минерального и общего фосфора в некоторых озерах Казахстана

Озеро	Год	$P_{\text{мин}}, \text{мг} \times \text{дм}^{-3}$	$P_{\text{общ}}, \text{мкг/л}$	$E, \text{кДж/моль}$
Копа	2012	0,012	69,5	-27,57
Бурабай	2012	0,005	25,0	-29,71
Улькен Шабакты	2012	0,006	21,5	-29,29
Шортан	2012	0,008	25,3	-28,58
Зеренда	2012	0,007	38,5	-28,91
Карасу	2012	0,010	32,6	-28,03
Майбалык	2012	0,061	169	-23,64
Султанкельды	2012	0,010	49,7	-28,03
Копа	2011	0,025	77,0	-25,82
Улькен Шабакты	2011	0,007	20,0	-28,91
Майбалык	2011	0,083	184	-22,89
Султанкельды	2011	0,042	113	-24,52
Зеренда	2011	0,012	33,0	-27,57
Киши Шабакты	2011	0,010	62,0	-28,03
Боровое	2010	0,006	24,0	-29,29
Улькен Шабакты	2010	0,009	21,0	-28,28
Шортан	2010	0,014	30,0	-27,20
Копа	2009	0,008	36,0	-28,58
Боровое	2009	0,007	12,0	-28,91
Улькен Шабакты	2009	0,004	10,0	-30,25
Шортан	2009	0,004	13,0	-30,25
Малое Чебачье	2009	0,011	23,0	-27,78
Копа	2008	0,005	26,0	-29,71
Копа	2006	0,009	34,0	-28,28
Боровое	2006	0,010	12,0	-28,03
Улькен Шабакты	2006	0,006	12,0	-29,29
Копа	2005	0,010	44,0	-28,03
Боровое	2005	0,009	19,0	-28,28
Шортан	2005	0,011	23,0	-27,78

же таблице приведены величины E_i , рассчитанные по формулам (1) и (2). При этом формула (2) была преобразована нами таким образом, чтобы размерность величины E была выражена в кДж/моль (1 ккал = 4,184 кДж):

$$E_i = -5,607 \times \lg \beta_o = -5,607 \times \lg (1000/C_o) \quad (3)$$

Для последующего анализа были использованы концентрации минерального фосфора в феврале и средние за год концентрации фосфора общего.

Результаты и их обсуждение

По данным, приведенным в таблице 2, выявлена статистически значимая однопараметрическая линейная зависимость между средними за год концентрациями фосфора общего и значениями минимальных энергетических затрат,

характеризующими содержание фосфора минерального в феврале (см. также рис. 1):

$$P_{\text{общ}} = 668,2 + 22,32 \times E_p \quad (4)$$

$n = 29; r = 0,91; r^2 = 0,83; \sigma_{Y(X)} = 18,1;$
 $F_p = 132,9; F_T = 4,2; F_p / F_T = 31,6.$

Здесь n – количество наблюдений; r – коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между переменными; r^2 – коэффициент детерминации, характеризующий объяснимую долю разброса; $\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка; F_p и F_T – расчетное и табличное (при уровне значимости 95 %) значения критерия Фишера.

Согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002] приведенное значение коэффициента корреляции свидетельствует о весьма высокой тесноте связи между $P_{\text{общ}}$ и E . Кроме того, как следует из приведенных статистических

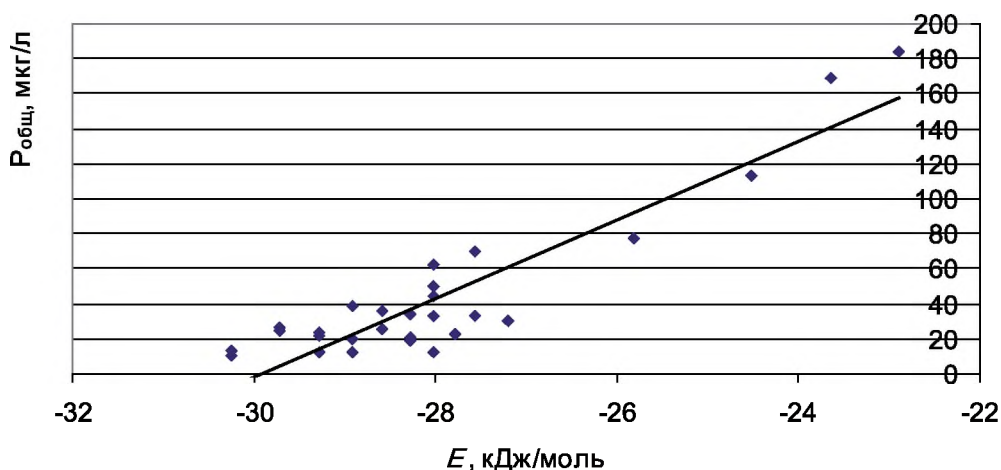


Рис. 1. Зависимость средних за год концентраций фосфора общего от величин минимальных энергетических затрат



Рис. 2. Алгоритм прогнозирования трофического статуса озер Казахстана

Таблица 3. Классификация трофического статуса озер Казахстана

Трофический статус	E_p , кДж/моль	$P_{мин}$, мг/л (в феврале)
Ультраолиготрофный	$< -29,75$	$< 0,005$
Олиготрофный	$-29,75 \div -29,48$	$0,005-0,006$
Мезотрофный	$-29,48 \div -28,36$	$0,006-0,009$
Евтрофный	$-28,36 \div -25,45$	$0,009-0,029$
Гипертрофный	$> -25,45$	$> 0,029$

характеристик, аналитическое уравнение (4) адекватно ($F_p > F_T$) и может быть использовано для предсказания средних за год концентраций фосфора общего, так как $F_p / F_T > 4$ [Дрейпер, Смит, 1973].

На основе таблицы 1 и формулы (4) была разработана классификация трофического статуса озер Казахстана в зависимости от значений минимальных энергетических затрат фосфора минерального в феврале (табл. 3).

Из данных, приведенных в таблице 3, следует, что если в феврале концентрации фосфора минерального меньше 0,005 мг/л, то прогнозируемый трофический статус озера будет олиготрофным. Если в феврале концентрации

фосфора минерального будут варьировать от 0,009 до 0,029 мг/л, то прогнозируемый трофический статус озера будет евтрофным.

Прогнозирование трофического статуса озер Казахстана проводится на основе алгоритма, приведенного на рисунке 2.

Вывод

Линейная зависимость между средними за год концентрациями фосфора общего и значениями содержания фосфора минерального в феврале может быть использована для краткосрочного прогнозирования трофического статуса озер Казахстана.

Литература

Волохонский А. Г. Структурные и энергетические аспекты проблемы дефицитности биогенных элементов // Экология. 1973, № 2. С. 5–11.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 252 с.

Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж. Термодинамическая оценка состояния водных объектов // Общество. Среда. Развитие. 2013, № 1. С. 232–235.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного евтрофирования. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 279 с.

Galvez-Cloutier R., Sanchez M. Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada. Monitoring and Recommendations // Water Qual. Res. J. Canada, 2007. Vol. 42, No 4. P. 252–268.

Поступила в редакцию 17.12.2014

References

Dreiper N., Smit G. Prikladnoi regressionnyi analiz [Applied regression analysis]. Moscow: Statistika, 1973. 392 p.

Frumin G. T., Khuan Zh.-Zh. Termodinamicheskaya otsenka sostoyaniya vodnykh ob'ektov [Thermodynamic assessment of the water bodies]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development]. 2013, No 1. P. 232–235.

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 252 p.

Volokhonskii A. G. Strukturnye i energeticheskie aspekty problemy defitsitnosti biogennykh elementov [Structural and energetic aspects of the problem of

deficiency of biogenic elements]. *Ekologiya* [Ecology]. 1973, No 2. P. 5–11.

Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R. Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. The causes and control of anthropogenic eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 279 p.

Galvez-Cloutier R., Sanchez M. Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada. Monitoring and Recommendations. *Water Qual. Res. J. Canada*, 2007. Vol. 42, No 4. P. 252–268.

Received December 17, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

профессор кафедры экологии, д. х. н.
Российский государственный гидрометеорологический университет
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург,
Россия, 195196
эл. почта: gfrumin@mail.ru

Крашановская Юлия Викторовна

аспирант кафедры экологии
Российский государственный гидрометеорологический университет
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург,
Россия, 195196
эл. почта: yulia3885@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Russian State Hydrometeorological University
98 Maloohntinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia
e-mail: gfrumin@mail.ru

Krashanovskaya, Yulia

Russian State Hydrometeorological University
98 Maloohntinsky Pr., 195196 St. Petersburg, Russia
e-mail.: yulia3885@gmail.com

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 56.074.6 : 551.312 (571.151)

КОМПЛЕКСНЫЕ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА МАНЖЕРОКСКОЕ В ПРЕДГОРЬЯХ АЛТАЯ

Т. А. Бляхарчук^{1,2}, Е. Ю. Митрофанова³, А. Н. Эйрих³

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения РАН

² Томский государственный университет

³ Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН

Сопряженный спорово-пыльцевой, диатомовый и геохимический анализ образцов сапропеля из верхней 80-см толщи озерных отложений озера Манжерокское, расположенного на западных предгорьях Алтая (51°49'15,5" с. ш., 85°48'35,7" в. д., 400 м н. у. м.), выявил взаимосвязь тенденций в изменении локальной обводненности озера с динамикой окружающего растительного покрова, обусловленной изменением общей увлажненности климата. Экологический анализ комплексов диатомовых водорослей изученного разреза донных отложений озера Манжерокское и реконструкция изменения рН и уровня озерных вод на основе индикаторных видов диатомей выявили существование стадии мелкого водоема во время накопления осадков нижней части керна, резкое обводнение озера во время накопления осадков средней части озерного керна, дальнейшее понижение уровня озера и современный подъем вод. При этом стадия резкого обводнения озера сопровождалась повышением в озерном сапропеле концентраций химических элементов терригенного сноса и сильной деградацией диатомовых комплексов. Выявленная картина изменения локальной обводненности озера хорошо согласуется с палинологическими данными, указывающими на изменения в региональном растительном покрове и увлажненности климата, выразившиеся в сукцессиях от березовой лесостепи к сосновым и кедровым лесам и впоследствии к березово-сосновой антропогенно измененной лесостепи. Антропогенное влияние на ландшафт просматривается по находкам в верхней части разреза пыльцы рудерального комплекса (*Triticum*, *Plantago*, *Cannabis*, *Secale*, *Fagopirum*) и пыльцы дуба (*Quercus*), экзотичной для сибирской флоры. Изменения в диатомоценозах изученной части озерных отложений указывают на более высокую климатическую чувствительность небольшого и мелководного озера Манжерокское, расположенного в лесостепной зоне Алтая, по сравнению с крупным и глубоководным Телецким озером, находящимся в горно-таежной зоне северного Алтая.

К л ю ч е в ы е с л о в а: палеолимнология; спорово-пыльцевой анализ; диатомовый анализ; растительный покров; экологические условия; предгорья Алтая; геохимия озерных отложений.

T. A. Blyakharchuk, E. Yu. Mitrofanova, A. N. Eirikh. INTEGRATED PALAEOECOLOGICAL INVESTIGATION OF BOTTOM SEDIMENTS FROM LAKE MANZHEROKSKOYE IN THE PIEDMONT ALTAI REGION

Complementary spore-pollen, diatom and geochemical analysis of samples from upper 80 cm of lake sediments from Lake Manzherokskoye, situated in the western piedmont region of Altai Mountains, revealed correlations between trends in the local water content in the lake and changes in the surrounding dry land vegetation triggered by the change of the overall climate humidity. Ecological analysis of diatom complexes from the studied sediment section and reconstruction of pH variation based on diatom indicator-species revealed the following successions: 1 – a shallow water pool during downcore sedimentation; 2 – a sharp rise in the lake water content during mid-core sedimentation; 3 – following decrease of the lake level, and 4 – contemporary new rise of the water level in Lake Manzherokskoye. The reconstructed second stage of change in local conditions in Lake Manzherokskoye agrees with pollen data demonstrated change of dry land vegetation from birch forest-steppe to pine and Siberian cedar forests and, finally, to contemporary birch-pine anthropogenically transformed forest-steppe. During the sharp water rise stage the content of terrigenous elements increased in the lake sediments, whereas diatom complexes degraded considerably during this stage. Human influence on the landscape is seen in the top part of the studied lake sediment as indicated by findings of ruderal pollen (*Triticum*, *Plantago*, *Cannabis*, *Secale*, *Fagopirum*), as well as pollen of *Quercus*, which is exotic for Siberian flora. Changes in the diatom complexes in the examined section of the lake sediments point to a higher climatic sensitivity of the small and shallow Lake Manzherokskoye compared to the large and deep Lake Teletskoye.

Key words: palaeolimnology; spore-pollen analysis; diatom analysis; plant cover; ecological conditions; piedmont Altai Region; geochemistry of lake sediments.

Введение

Исследование естественной динамики климата и ее влияния на природные экологические системы в последние годы особенно актуально в связи с продолжающейся научной дискуссией о роли антропогенного фактора в глобальном потеплении климата. В этой связи верхние слои озерных отложений могут дать информацию как о динамике климата, так и об изменении общей экологической обстановки региона и конкретного водоема под воздействием естественных и антропогенных факторов относительно недавнего прошлого. Донные отложения озер обладают преимуществом, связанным с возможностью применения комплексного подхода, включающего палинологические исследования – для характеристики ландшафта на региональном уровне и диатомовые исследования – для характеристики локальных условий озера. При аккуратном разборе на сантиметровые образцы верхней полужидкой части озерного керна в вертикальном его положении прямо в полевых условиях мы получаем временные серии экологических данных с довольно высоким временным разрешением. В результате, даже при отсутствии выраженной годичной слоистости озерных отложений, можно выявить естественные природные циклы, сукцессии и влияние антропогенного фактора

на региональном и локальном уровнях. Годично-ламинированные озерные отложения встречаются редко и в основном в глубоких и крупных водоемах. Малые же озера распространены очень широко, и в отличие от крупных озер они являются менее устойчивыми системами, более чутко реагирующими на колебания климата [Mason et al., 1994]. Поэтому донные отложения именно малых озер особенно перспективны для палеоэкологических и палеоклиматических исследований.

Несмотря на рост количества и уровня палеоклиматических исследований, по-прежнему ощущается недостаток достоверных данных по изменениям внутриконтинентального климата. Малоизученными в этом плане остаются регионы Алтае-Саянской горной области. Между тем Алтайские горы расположены на границе гумидной и аридной климатических зон, и их экосистемы, включающие множество малых озер, особенно чувствительны к изменениям увлажненности климата. Палеолетописи горных озер Алтая являются связующим звеном между палеогеографическими схемами гумидных регионов Сибири и аридных регионов Средней Азии. На хребтах Алтае-Саянской горной области встречаются воздушные потоки атлантических циклонов и юго-восточных муссонов. Однако, несмотря на сложную структуру рельефа, разнообразие климатов и растительного

покрова Алтая, до настоящего времени имеют лишь единичные работы, посвященные либо только палинологическим исследованиям [Чернова и др., 1991; Blyakharchuk et al., 2004, 2007, 2008; Andreev et al., 2007; Schlutz, Lehmkuhl, 2007; Бляхарчук, 2008], либо только диатомовым исследованиям [Westover et al., 2006; Митрофанова, 2009; Митрофанова, Сутченкова, 2014], но нет комплексных палинологических и диатомовых исследований, проведенных по одному объекту, которые могут более объективно характеризовать динамику природно-климатической обстановки различных округов российской части Алтая. Последнее крайне необходимо для расшифровки динамики растительности и климата в этом узловом центрально-континентальном регионе.

Объект исследования

В 2010 г. объединенной группой исследователей из ИМКЭС СО РАН и ИВЭП СО РАН был отобран 80-см керн верхних слоев донных отложений из центральной части озера Манжерокского Майминского района Республики Алтай (51°49'15,5" с. ш., 85°48'35,7" в. д.) для комплексных палеоэкологических исследований (рис. 1). Глубина воды в месте отбора озерного керна составляла 300 см. Озеро Манжерокское расположено на высокой древней террасе правого берега реки Катунь на высоте 423 м над уровнем моря, в 2,5 км от современного ее русла и в 18 км к юго-западу от города Горно-Алтайска. Район Манжерокского озера представляет собой правый коленообразный изгиб долины р. Катунь, выполненный отложениями высоких и низких надпойменных террас реки, сложенных песчано-гравийно-галечниковыми, песчано-глинистыми с валунами и глыбами, песчаными и другими осадками. Горная долина р. Катунь в районе местоположения озера расширена до 3 км и образует крутой изгиб к востоку. Уровень озера превышает уровень р. Катунь на 88 м, длина озера – 1112 м, наибольшая ширина – около 400 м, площадь – 0,4 км² [Селедцов, 1963]. По происхождению озеро представляет собой фрагмент древнего русла Катунь и располагается на пятой надпойменной террасе [Цимбалей, 2008]. Территория характеризуется низкогорным рельефом с небольшой глубиной расчленения, пологими склонами и широким развитием делювиальных плащей [Смагин и др., 1980]. Из склоновых процессов наряду с делювиальным смывом развито медленное смещение элювия вниз по склону.

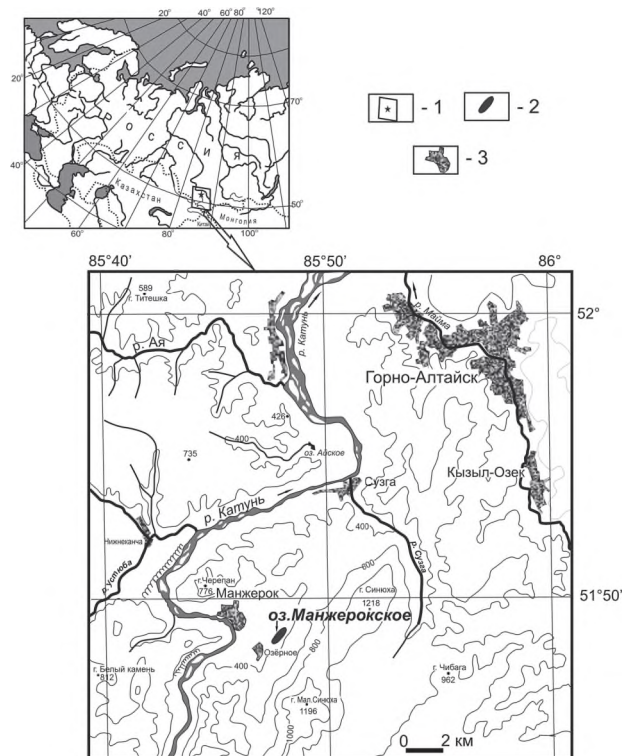


Рис. 1. Карта района исследований: 1 – район исследования; 2 – озеро Манжерокское; 3 – населенные пункты

Располагаясь на северо-западной периферии гор Южной Сибири, эта область выделяется наибольшей степенью увлажнения и сравнительно мягким, хотя и континентальным климатом, который классифицируется как континентальный западносибирский тип [Огуреева, 1980]. Осадков выпадает 500–700 мм в год. Сумма температур за безморозный период составляет 2430–2510°, наибольшая сумма положительных температур свыше 15° составляет 1280–1340° (пос. Кызыл-Озек). Средняя температура июля составляет +18 °С, января – 14–15° ниже нуля. Среднегодовые температуры колеблются в пределах от –4 до +2 °С.

Геоботанически район исследования находится в подтаежно-лесостепном высотном поясе в комплексе сосново-березовых лесов [Смагин и др., 1980], или в Северо-Алтайской таежно-лесостепной подпровинции [Куминова, 1960; Огуреева, 1980]. Сочетание растительных формаций создает ландшафт предгорной лесостепи, в которой степи сохранились только по южным склонам. Большие пространства заняты пахотными угодьями. Лесостепи окаймляют широкой полосой Горный Алтай по западным и северо-западным предгорьям, формируя лесостепной пояс в пределах абсолютных высот 500–700 м над уровнем моря. Нижняя и верхняя границы этого пояса в данном районе обусловлены годовым количеством осадков

600–800 мм. Сочетание луговых степей, остепненных лугов с березово-осиновыми перелесками по северным склонам носит характер западносибирской лесостепи. Встречаются сосняки разнотравно-ретидиевые, караганово-осоковые на серых лесных свежих и влажных суглинистых почвах и сосняки орляково-крупнотравно-снытевые на темно-серых лесных почвах.

Локальная растительность вокруг озера Манжерокское следующая. Склоны гор, расположенные к востоку и северо-востоку от озера, покрыты березово-осиновыми лесами с примесью сосны. На вершинах гор, возвышающихся над озером на 800–1000 метров, в состав древесных пород, помимо указанных выше, входят пихта, кедр, лиственница. Узкая полоса восточного побережья озера от основания склонов до берегов перекрыта озерными отложениями, заболочена, зарастает лесом и кустарниками. Западная сторона представляет собой полого-наклонную к озеру поверхность, распаханную на ширину до 600 м. На месте этого поля в первой половине прошлого века был сосновый лес с березой и луговыми полянами. Лес был постепенно вырублен, и после 1945 г. произведена распашка. За полем вся терраса на площади несколько квадратных километров покрыта сосновым бором с примесью березы и осины. Узкая (5–15 м шириной) прерывистая полоса кустарников (ива, черемуха, калина) окаймляет озеро. В 1973 г. вдоль его западного берега была заложена 50-метровая водоохранная лесополоса из дуба, сосны, тополя.

Озеро Манжерокское на современном этапе своего развития выделяется среди других водоемов Горного Алтая большим разнообразием водных растений. В. В. Ильин [1982] для данного водоема отмечает 25 видов погруженных и полупогруженных растений-макрофитов, среди которых и реликтовый эндемичный вид *Trapa pectinata* V. Vassil – водяной орех гребенчатый. И. М. Краснобров с соавторами [Краснобров и др., 2012] и А. Л. Эбель [2012] для Горного Алтая, и в частности в озере Манжерокском, отмечают вид водяного ореха – *Trapa natans*. По данным В. В. Ильина, в 70-е годы 20 века в озере была богатая водная растительность. Большие заросли водяного ореха располагались в юго-западной и северо-восточной оконечностях озера. Ближе к берегу шла узкая полоса, образованная кувшинково-разнотравной группировкой, в которой ассоциация с гидриллой мутовчатой находилась ближе всего к берегу. Непосредственно к берегу примыкала сплавина, образованная вахтой трехлистной, белокрыльником, болотными осоками,

рогозом, тростником. Во время отбора озерных отложений для палеоэкологических исследований в июле 2010 г. водяной орех встречался в озере лишь в виде редких разрозненных экземпляров. Плавающие макрофиты были представлены в основном лишь экземплярами кувшинки чисто-белой. Участки сплавины прослеживались только вдоль восточного берега озера. Таким образом, можно отметить, что за 28 лет, прошедших после описания водной растительности озера В. В. Ильиным [1982], обилие водных макрофитов в Манжерокском озере сильно сократилось.

В озеро впадает несколько небольших ручьев, стекающих со склонов горы Синюхи, а вытекает один ручей в юго-западной оконечности водоема. Питание озера осуществляется за счет атмосферных (талых и дождевых) и подземных вод. Озеро мелководное и слабoproточное. Озерная котловина представляет собой плоскодонную впадину с пологими склонами. Глубина постепенно увеличивается от берегов к центральной части озера. На основной площади глубина не превышает 2,5–2,8 м, максимальная – 3 м. По характеру господствующих донных отложений, представленных сапропелем, глубине и свойствам воды озеро Манжерокское относится к эвтрофному типу. В фитопланктоне преобладают в летний период в основном зеленые и синезеленые водоросли, в зимний период подо льдом – фллагелляты из криптофитовых, т. е. водоросли с мягкими клеточными оболочками, которые в донных отложениях не сохраняются. Диатомовые водоросли в фитопланктоне озера играют второстепенную роль.

Методы исследования

Для палеоэкологических исследований из верхней полужидкой части озерных отложений был отобран ненарушенный керн мощностью 80 см и диаметром 5 см. Отбор производился специальным озерным буром поршневого типа. Колонка полужидкого сапропеля в вертикальном положении транспортировалась на берег и в стационарных условиях в вертикальном же положении была разобрана на образцы с шагом 1 см для высокоразрешающих палеоэкологических исследований, результаты которых, требующие более длительного времени для их получения, будут опубликованы позднее. Для данной публикации из полученной серии образцов каждый пятый был проанализирован спорово-пыльцевым и диатомовым методами. К настоящему времени для изученных палеоэкологическими методами образцов

Таблица 1. Литология верхней 80-см толщи озерных отложений оз. Манжерокское

№ слоя	Глубина (см)	Визуальное описание текстуры донных отложений
1.	0–10	Полужидкий бурый тонкодисперсный гомогенный сапропель
2.	11–37	Желеобразный темно-бурый тонкодисперсный гомогенный сапропель
3.	38–43	Желеобразный темно-бурый тонкодисперсный сапропель с мелким растительным детритом и крупными включениями ореха <i>Trapa natans</i>
4.	44–52	Желеобразный темно-бурый сапропель с макроостатками хвоща, осок и других водно-болотных растений
5.	53–79	Темно-бурый сапропель с крупными макроостатками зеленого мха <i>Drepanocladus sentherii</i>
6.	80–81	Желеобразный темно-бурый гомогенный сапропель с крупными включениями ореха <i>Trapa natans</i>

определено содержание химических элементов (Mn, Fe, Cu, Ni, Pb, Cd, Zn, U, Th) в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН и Институте минералогии УрО РАН.

Литологический анализ

Визуальное описание литологии колонки свежих донных отложений представлено в таблице 1.

Для количественного литологического анализа образцы высушивались при температуре 105 °С до постоянного веса [Heiri et al., 2001]. После определения потерь от прокаливания при температурах 550 и 950 °С определялось относительное содержание органики, карбонатов и минеральной фракции в донных отложениях.

Спорово-пыльцевой анализ

Для спорово-пыльцевого анализа образцы озерного сапропеля объемом 1 см³ были подвергнуты щелочной обработке по методике Поста [Гричук, 1948] и просеяны через сито 0,3 мм. Ацетализ не использовался. Из полученного отмытого от щелочи образца были изготовлены глицериновые препараты, предварительно окрашенные фуксином. Спорово-пыльцевой анализ образцов проводился Т. А. Бляхарчук в ИМКЭС СО РАН с помощью светового микроскопа при увеличении в 400 раз. Для определения форм пыльцы и спор использовались отечественные и зарубежные определители пыльцы [Куприянова, 1965; Куприянова и Алешина, 1972, 1978; Бобров и др., 1983; Reille, 1995; Moore et al., 1997], а также коллекция постоянных препаратов пыльцы известных видов растений флоры Сибири. При спорово-пыльцевом анализе в каждом образце определялось от 478 до 747 палиноморф. Видовое разнообразие в спектрах варьировало от 28 до 44 типов. Типы определялись до таксономических единиц: вида, рода, семейства или группы видов (type). При интерпретации палинологических данных использовался традиционный метод оценки общего

состава пыльцевых спектров по соотношению древесной, травяной и споровой групп палиноморф. Кроме того, для объединенной группы травяных и споровых палиноморф была проведена оценка по экологическим подгруппам [Бляхарчук, 2007]. При этом выделялись условные подгруппы, а именно: древесные, в которую входила пыльца древесных растений; кустарники, объединявшая пыльцу кустарников и кустарничков; рудералы, к которым мы отнесли пыльцу *Hordeum*, *Triticum*, *Secale*, *Fagopirum*, *Cannabis*, *Urtica*, *Plantago*, *Lactuca sativa*, *Sonchus arvensis*; ксерофиты, в которую входила пыльца полыни, маревых, эфедры, ковыля; подгруппа гидрофитов и аэрогидрофитов, в которую входила пыльца водно-болотных растений и осоки; подгруппа мезофитных трав, в которую входили все оставшиеся виды травянистых растений.

Диатомовый анализ

Для диатомового анализа образцы осадков высушивали до постоянного веса, отбирали навеску 0,005 г, в течение суток выжигали органику 30%-й перекисью водорода с добавлением нескольких капель соляной кислоты. После трехкратного промывания дистиллированной водой каплю объемом 0,01 мл с осадком наносили на предметное стекло, высушивали и заключали в канадский бальзам. Полученные препараты исследовали с помощью светового микроскопа Laboval 4 (Karl Zeiss). Диатомовый анализ выполнен Е. Ю. Митрофановой в ИВЭП СО РАН. Идентификацию и систематизацию диатомей проводили с использованием классических и современных определителей, сводок и атласов [Забелина и др., 1951; Диатомовые водоросли..., 1992; Hartley et al., 1996]. Эколого-географическая характеристика водорослей приведена по С. С. Бариновой [Баринова и др., 2006]. При подсчете створок в препаратах учитывали все встреченные панцири диатомовых водорослей, пересчет количества проводили на 1 грамм осадка. Реконструкцию значений pH проводили на основе уравнения линейной

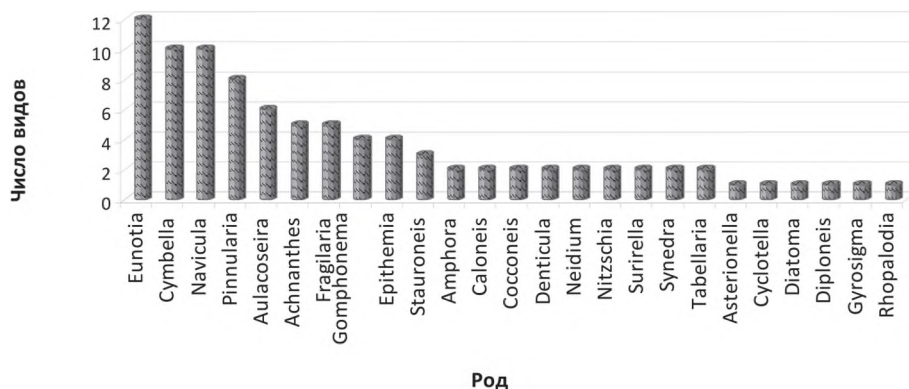


Рис. 2. Распределение выявленных видов диатомовых водорослей по родам в донных отложениях озера Манжерокское

регрессии по индексу В, разработанному для озер Швеции [Renberg, Hellberg, 1982]: $V = (\% \text{ circ} + 5 \% \text{ acf} + 40 \% \text{ acb}) / (\% \text{ circ} + 3,5 \% \text{ alkf})$. Нами было использовано уравнение, полученное для одного из озер Кольского Севера [Моисеенко и др., 1997], близкого по уровню рН к озеру Манжерокское:

$$pH = 6,40 - 0,85 \log V.$$

Микроэлементный анализ

Высушенные образцы донных отложений массой 0,2–0,3 г помещали в тефлоновые стаканы, добавляли 5 мл концентрированной HNO_3 марки «особо чистые» (о. с. ч.) и разлагали в микроволновой печи MARS-5. Использовали метод US EPA, включающий программу SW-3051 (микроволновая пробоподготовка почв, донных отложений и шламов). Следует отметить, что по описанным методикам в пробах донных отложений определяют только подвижные формы металлов, то есть сорбированные на минеральном материале или содержащиеся в органической и легкоокисляемой составляющих. Концентрации тяжелых металлов (Mn, Fe, Cu, Ni, Pb, Cd, Zn) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием пламенного варианта (ацетилен-воздух) и электротермической атомизации на приборе SOLAAR M-6; для градуировки прибора использовали стандартные растворы ГСО определяемого элемента. Контроль правильности определений микроэлементов проводили с помощью метода добавок и образцов сравнения (stream sediment NCS DC 73307). Исследование содержания тяжелых металлов в донных отложениях озера Манжерокское выполнено в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН, г. Барнаул.

Графика и статистическая обработка данных

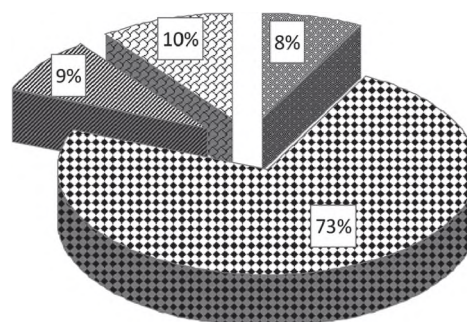
Для построения спорово-пыльцевой и общей диатомовой диаграммы использовалась

графическая программа Tilia 2 [Grimm, 2004]. Кластерный анализ численных данных спорово-пыльцевого и диатомового анализов был выполнен с помощью программы CONISS, встроенной в Tilia 2. Построение циклограмм и расчет процентов осуществлялись с помощью программы Excel 2003. Для создания карты района исследования использовались программы CorelDRAW X3 и Adobe Photoshop CS2.

Результаты диатомового анализа

В донных отложениях озера выявлено 94 вида (115 видов, разновидностей и форм) диатомовых водорослей, принадлежащих к 25 родам (рис. 2). Наиболее насыщенным по числу видов является род *Eunotia*, далее следуют *Cymbella* и *Navicula*, а также *Pinnularia*. Все представители этих родов встречаются в бентосе и обрастаниях, многие из них обитают в закисленных условиях при заболачивании водоемов. Род *Aulacoseira*, следующий по числу видов, содержит истинно планктонных представителей.

По местообитанию весь выявленный комплекс диатомовых водорослей делится на четыре экологические группы, среди которых



■ Планктонные ■ Бентосные ■ Планкто-бентосные ■ неизв.

Рис. 3. Соотношение групп диатомовых водорослей по местообитанию в донных отложениях озера Манжерокское

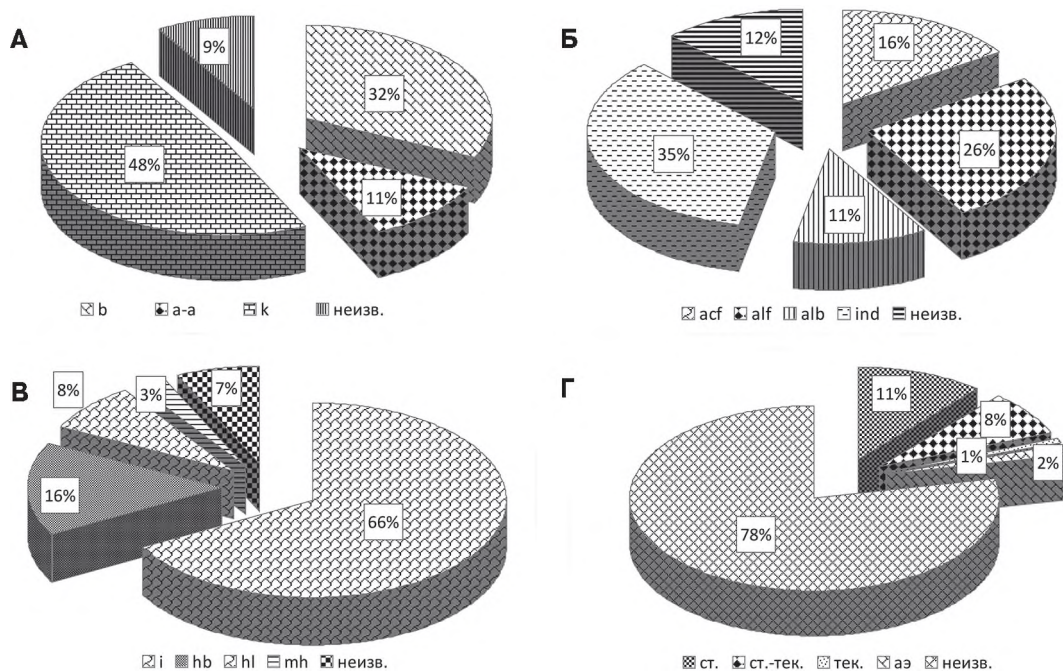


Рис. 4. Соотношение таксонов диатомовых водорослей в донных отложениях озера Манжерокское:

(А) по географическому распространению: к – космополит, b – бореальный, а-а – аркто-альпийский; (Б) по отношению к pH среды: alf – алкалифилы, alb – алкалибионты, acf – ацидофилы, ind – индифференты; (В) по галобности: mh – мезогалобы, hl – галофилы, hb – галофобы, i – индифференты; (Г) по реофильности: ст. – стоячий, тек. – текущий, ст.-тек. – стояче-текущий и/или индифферент, аэ – аэрофил

преобладают представители бентосных группировок и обрастаний (85 таксонов). Следующие три группы – планктонные виды (представлены 9 таксонами), планктонно-бентосные (выявлено 10 таксонов) и виды с невыясненной экологической характеристикой – присутствуют в танатоценозах озера примерно в равных долях (рис. 3).

По географическому распространению в сообществах диатомей преобладают космополиты и виды бореального комплекса – 56 и 37 таксонов соответственно (рис. 4, А). Среди индикаторов ацидификации наиболее многочисленны таксоны-индифференты (40) и алкалифилы (30) (рис. 4, Б); среди индикаторов галобности тоже преобладают индифференты (77 таксонов) (рис. 4, В). Индикаторов реофильности выявлено мало – 25 таксонов, большинство из которых – представители стоячих вод (13 видов); основная масса таксонов была с невыясненной характеристикой по этому показателю (рис. 4, Г). В целом экологический анализ выявленных таксонов показал, что из видов с известными характеристиками преобладают бентосные бореальные алкалифильные галофобные виды стоячих вод, это является характерным для мелководных стоячих небольших по площади пресных озер.

Сапробиологический анализ флоры диатомей в донных отложениях озера Манжерокское

показал, что индикаторами степени сапробности воды являются 71 таксон (62,3 % от общего их числа). Большая часть из выявленных таксонов – β-мезосапробионты (31 таксон, или 27,2 % от общего числа таксонов и 43,7 % от числа индикаторов сапробности). На втором месте стоит группа олигосапробионтов (29 таксонов, 25,4 и 40,8 % соответственно), третьими в ранжировании идут ксеносапробионты (10 таксонов, 8,8 и 14,1 % соответственно). Всего один таксон выявлен в группе α-мезосапробионтов (0,9 и 1,4 % соответственно). Таким образом, в составе диатомей в верхней части донных отложений озера преобладают индикаторы умеренно загрязненных и чистых вод.

Количество створок диатомей в исследованных слоях донных отложений озера тоже изменялось в значительных пределах – от 0,08 до 74,88 млн ств./г. От нижних слоев к верхним наблюдается незначительное уменьшение числа видов диатомей и увеличение количества их створок с максимумами в верхних 5–16 см керна. В средних слоях на глубине 30–41 см число створок диатомовых водорослей снижалось практически до минимальных значений (рис. 5). Такое резкое уменьшение количества створок может свидетельствовать о кардинальной смене экологических условий в водоеме в период накопления сапропеля этого уровня.

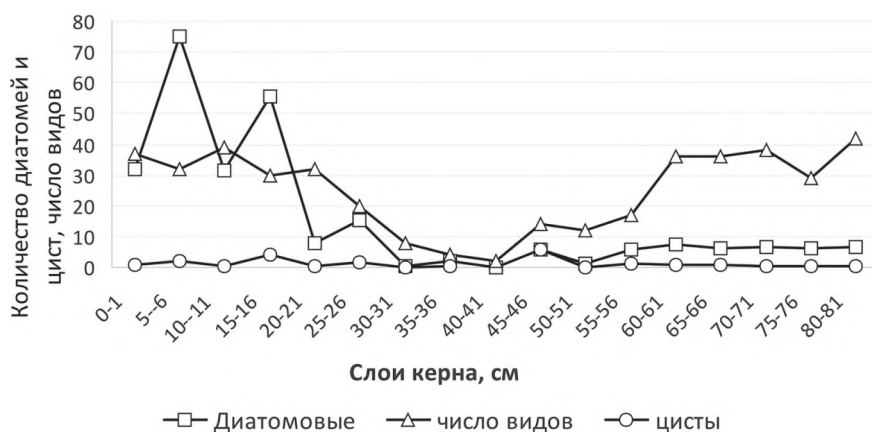


Рис. 5. Изменение количества створок диатомовых водорослей и числа цист золотистых водорослей в разных слоях донных отложений озера Манжерокское

Среди всех видов по количеству створок выделяется планктонный вид *Aulacoseira italica* (Ehr.) Sim. (рис. 6, А), который, отсутствуя в нижней части озерного керна, резко возрастает в обилии с глубины 10 см, где составляет 33,5 %. Этот вид в поверхностных слоях донных отложений достигает численности 22,48 и 25,36 млн ств./г, что составляет 70,6 и 33,9 % от общего числа створок.

В отличие от *A. italica* другая диатомея, *Stauroneis anceps f. gracilis* (Ehr.) Cl., встречается практически во всех слоях исследованного керна, но с меньшей численностью (рис. 6, Б), и доля ее в общем количестве створок диатомовых водорослей максимальна в средней части керна на глубине 45–46 см. Как

отмечают исследователи современных водорослей [Куликовский, 2008], этому виду присуще обитание в заболоченных водоемах различной природы.

Распределение видов диатомовых водорослей в разных слоях донных отложений озера различно (рис. 7). Развитие бентосных видов рр. *Eunotia* и *Pinnularia* может свидетельствовать о заболачивании водоема ввиду его обмеления и закисления. Постепенное обмеление и заболачивание водоемов в результате их естественной эвтрофизации – это общая тенденция, наблюдаемая в небольших по площади и мелководных водоемах. Из литературы [Stefkova, 2008] известно, что вспышки численности видов р. *Eunotia* характерны для

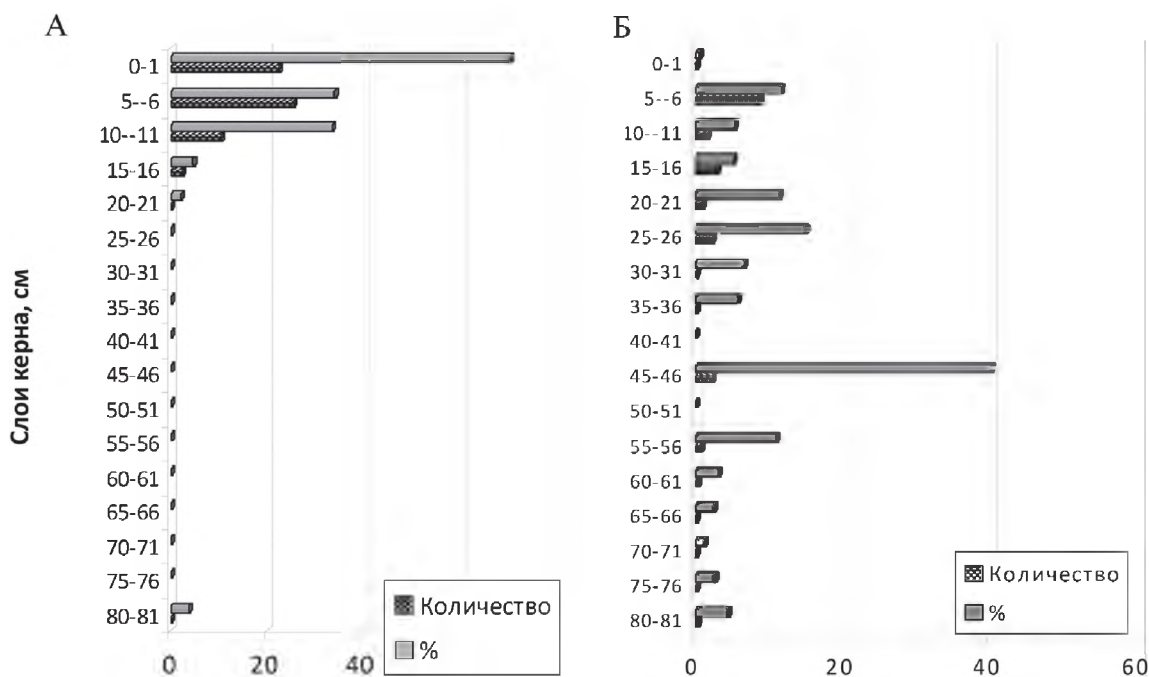


Рис. 6. Изменение количества створок, млн ств./г, и доли в общей численности *Aulacoseira italica* (Ehr.) Sim. (А) и *Stauroneis anceps f. gracilis* (Ehr.) Cl. (Б) в донных слоях озера Манжерокское

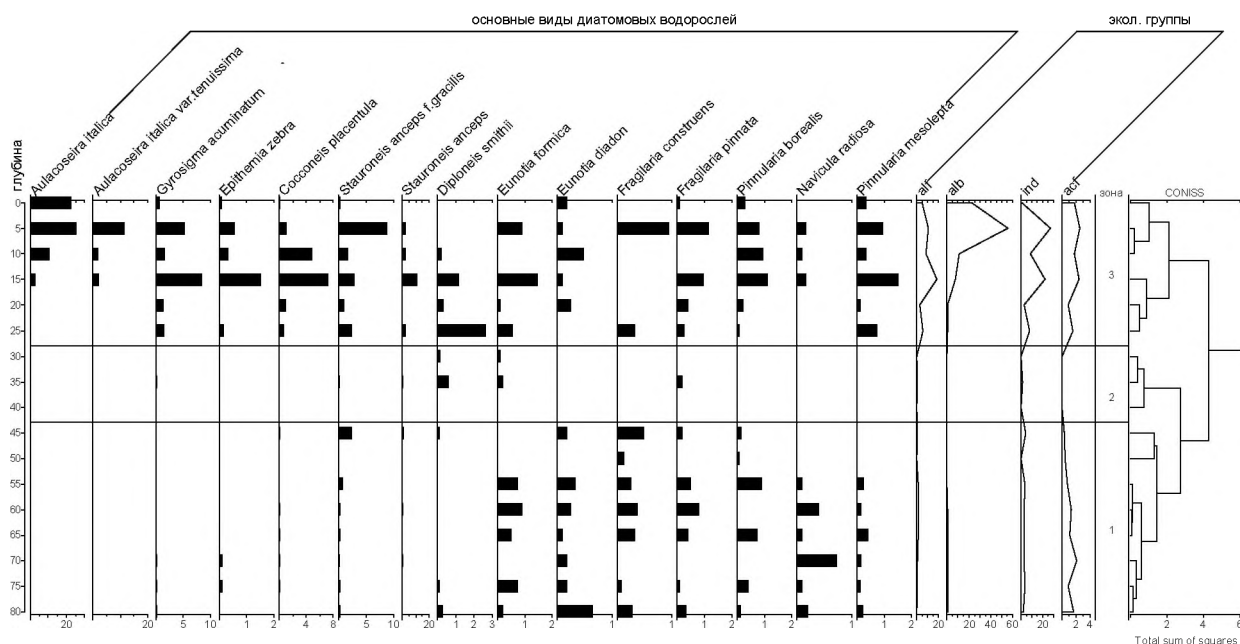


Рис. 7. Стратиграфия некоторых видов диатомовых водорослей в керне донных отложений озера Манжерокское (количество створок в млн ств./г)

периодов acidification водоемов. Но при изменении гидрологических условий в водоеме, т. е. повышении его проточности и водообмена, деградиционный путь развития может поменяться на эволюционный, что, вероятно, и произошло с озером Манжерокским в его историческом развитии. Планктонные виды родов *Aulacoseira* и *Cyclotella* приурочены в основном к верхней части керна, что может свидетельствовать о формировании истинно планктонного комплекса в водоеме в этот период.

Реконструкция pH по индикаторным видам диатомей

На изученном интервале керна донных отложений озера была реконструирована величина pH по наличию в составе диатомовых комплексов видов-индикаторов содержания водородного иона (см. рис. 7, 8). Выделение групп видов-индикаторов, чувствительных к изменению pH воды, было сделано в 30-е годы XX века Ф. Хустедтом. Он объединил такие виды в 11 групп: от алкалибионтов, обитающих в водах с pH = 8 и более, до ацидобионтов, живущих в кислых водах с pH = 5 и менее [Баринава и др., 2006]. Основные группы: alb – алкалибионты, предпочитающие среду с pH = 8,5; alf – алкалофилы, предпочитающие среду с pH > 7; circ (ind) – циркумнейтралы (индифференты) (pH = 7); acf – ацидофилы (pH < 7); acb – ацидобионты (pH = 5,5).

Анализ видов-индикаторов pH в изученном керне озерных отложений озера Манжерокское

показал, что их соотношение заметно изменяется вдоль по керну (см. рис. 7). В нижних частях керна повышена доля ацидофилов с максимумом на глубине 50–51 см, в верхних слоях более значимы виды-алкалибионты. Доля видов-алкалофилов максимальна в средней части керна на глубине 31–41 см.

Использование уравнения расчета pH по соотношению индикаторных видов диатомей [Моисеенко и др., 1997] позволило реконструировать величину pH для каждого из слоев исследованного отрезка керна донных отложений. Расчетная величина pH изменялась в пределах 6,09–6,96 (см. рис. 8) при среднем значении $6,54 \pm 0,06$, т. е. соответствовала слабокислой среде. Линия тренда показывает постепенное увеличение величины pH от основания керна к поверхности. При исследовании подледного фитопланктона Манжерокского озера в марте 2007 г. реакция среды также была слабокислая и величина pH изменялась в пределах 6,3–6,7 [Митрофанова, 2009].

Подобная реконструкция изменения величины pH была сделана и для глубокого Телецкого озера для керна донных отложений с подводного хребта Софьи Лепневой [Митрофанова, Сутченкова, 2014]. Оказалось, что на протяжении последних 2000 лет для Телецкого озера величина pH изменялась в интервале 7,51–7,69 при среднем значении $7,580 \pm 0,003$, т. е. соответствовала слабощелочной среде. Таким образом, диапазон изменения реконструированной pH для Телецкого озера был меньше, чем

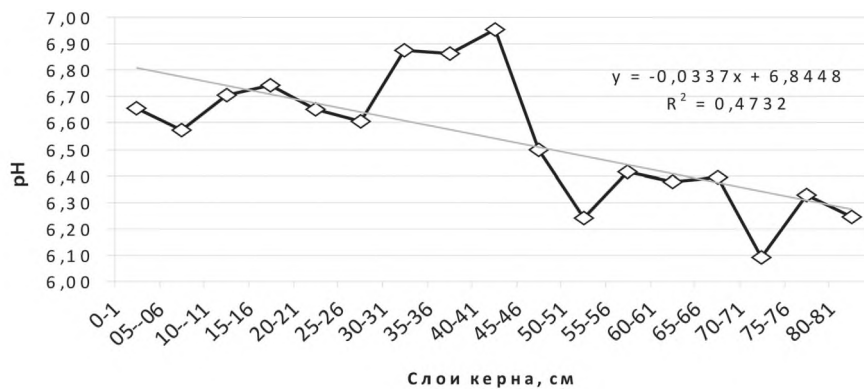


Рис. 8. Величина pH (с линией тренда), реконструированная по данным диатомового анализа в донных отложениях озера Манжерокское

таковой, выявленный для озера Манжерокское, что может свидетельствовать о большей стабильности глубокого и более крупного водоема по сравнению с более мелким и меньшим по объему озером.

Соотношение численности планктонных (P), бентосных (B) и планкто-бентосных (P-B) форм диатомовых водорослей в разных слоях донных отложений озера Манжерокское может косвенно свидетельствовать об изменении уровня воды в озере с течением времени [Wolin, Stone, 2010]. Так, развитию планктонных форм способствуют более спокойные и глубоководные условия озера. Развитию бентосных форм, напротив, способствует большая проточность воды в озере. Анализируя данные диатомового анализа для донных отложений озера Манжерокское, можно отметить, что в нижних слоях отложений более значимы были бентосные формы, а в верхних – планктонные (рис. 9). Поэтому можно заключить, что на более отдаленном историческом отрезке времени уровень озера был ниже, а в период, более близкий к современному, он стал выше. Резкое повышение уровня воды в озере, вероятно, имело место в период накопления средней части осадков изучаемого кернa на глубине 40–41 см, так как бентосные формы на данном отрезке кернa составляли 100 %. После этого периода уровень воды в озере несколько понизился и стабилизировался, что способствовало массовому размножению планктонных видов диатомей. Выводы по изменению уровня воды в озере хорошо согласуются с реконструированной величиной pH. При низком уровне воды в озере pH был низким, и накапливался сапропель нижней части кернa. При резком повышении уровня озера pH увеличился, и отложился сапропель средней части кернa. Позднее уровень воды в озере несколько понизился, и pH тоже снизился. Ближе к современности уровень воды

в озере Манжерокское вновь повысился, хотя и не достиг уровня, соответствовавшего средней части кернa.

Индикаторами изменения уровня воды и изменения pH воды могут служить и высшие водные растения, или макрофиты. Выявлено, что погруженные гидрофиты существенно меняют ряд гидрохимических показателей среды. Так, в экспериментальных экосистемах при активном фотосинтезе погруженных растений (элодеи, роголистника) отмечали насыщение воды кислородом и изменение карбонатного равновесия значения pH в щелочную сторону [Курбатова и др., 2013]. Кривая реконструированной величины pH показывает более высокие значения pH для средней части кернa донных отложений. Вероятно, во время накопления сапропеля этой части кернa озеро было максимально глубоким и в нем доминировали погруженные макрофиты, тогда как до этого периода и после него глубина озера была меньше, и это благоприятствовало развитию зарослей плавающих гидрофитов и аэрогидрофитов, которые, напротив, способствуют ацидификации водоема.

Наряду со створками диатомовых водорослей к кремнийсодержащим организмам, которые хорошо сохраняются с течением времени в донных отложениях и имеют индикаторное значение, принадлежат и цисты золотистых водорослей. В донных отложениях озера Манжерокское были встречены цисты различных морфотипов золотистых водорослей – сферической формы с простой порой и воротничками, удлиненной формы также с различными воротничками. В разных слоях донных отложений озера цисты встречались постоянно, не отмечены они только в слое с наименьшим количеством створок диатомовых водорослей – 40–41 см (рис. 5). Соотношение общего количества цист и створок диатомей в разных слоях кернa было различным. В нижней части кернa

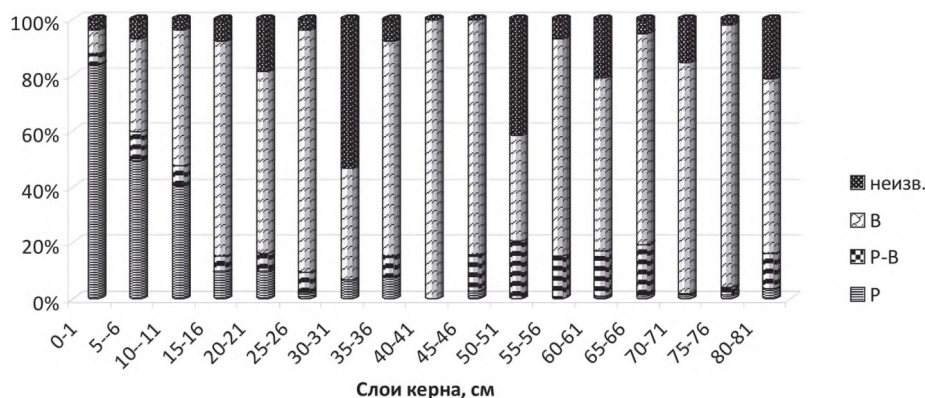


Рис. 9. Доля экологических групп водорослей в общем количестве створок диатомей в донных отложениях озера Манжерокское (расшифровка в тексте)

(65–81 см) оно было равно 1 : 10–19, в средней части (45–46 см) – 1 : 1, в верхней части (0–21 см) – как 1 : 25–60. Стоит отметить, что доля цист в общем количестве кремнистых образований увеличивалась в слоях, где были более значимы донные диатомеи.

Таким образом, анализируя данные по составу и количеству диатомовых водорослей в различных слоях керна донных отложений озера Манжерокское, можно отметить, что на изученном отрезке керна происходили сукцессии как отдельных видов диатомей, так и диатомоценозов озера в целом, свидетельствующие о существовании мелководного водоема во время накопления нижней трети озерного керна, резкого обводнения озера при накоплении средней части керна и постепенного снижения обводненности озера при отложении верхней части озерных осадков. Именно мелководные водоемы более подвержены быстрой смене альгоценозов в процессе естественной эволюции водоема и под действием колебаний уровня озерных вод. В мелководном Манжерокском озере с течением времени условия менялись, вероятно, более кардинально, чем в глубоководном Телецком озере, что нашло отражение в развитии диатомоценозов озера.

Результаты спорово-пыльцевого анализа

Данные спорово-пыльцевого анализа представлены в виде процентной диаграммы, в которой проценты высчитывались от суммы всей пыльцы и спор за вычетом локальных компонентов Bryales, Carex, пыльцы водных растений и непыльцевых палиноморф (рис. 10). С помощью кластерного анализа, встроенного в графическую программу Tilia 2 [Grimm, 1994], спорово-пыльцевая диаграмма озера Манжерокского была разделена на четыре спорово-пыльцевые зоны. Описание пыльцевых зон

приводится от нижней части озерного керна к его верхним слоям.

1. *Спорово-пыльцевая зона 1 (80–47 см) – Betula.* В спорово-пыльцевых спектрах этой зоны доминирует пыльца березы (*Betula pendula* Roth) при малом обилии пыльцы сосны лесной (*Pinus sylvestris* L.), составляющей от 10 до 17 %, и кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) – 4–7 %. Пыльца обоих видов сосен содержится в спектрах этой зоны в количествах, характерных для дальнего переноса. Для этой пыльцевой зоны отмечено повышенное обилие пыльцы полыни (*Artemisia*) (8,6–13 %) и высокое видовое разнообразие пыльцы травянистых растений (30 типов). Постоянно присутствует в спектрах пыльца погруженно-водных и прибрежно-водных растений.

2. *Спорово-пыльцевая зона 2 (47–23 см) – Pinus.* Данная спорово-пыльцевая зона выделяется по резкому возрастанию обилия пыльцы сосны и кедра (26–40 % и 4–16 % соответственно) при снижении участия пыльцы березы. Характерным является заметное снижение обилия пыльцы растений ксерофитного комплекса (*Artemisia* и *Chenopodiaceae*). Среди локальных компонентов спорово-пыльцевого спектра в верхней части пыльцевой зоны резко повышается обилие пыльцы и спор болотных растений: *Carex*, *Equisetum*, Bryales. Отличительным признаком этой пыльцевой зоны является также повышенное обилие микрогольков и пыльцы растений рудерально-сорного комплекса: *Triticum*, *Secale*, *Cannabis*, *Urtica*. По сравнению с предыдущей пыльцевой зоной видовое разнообразие пыльцы травянистых растений в этой зоне снижается до 18 типов.

3. *Спорово-пыльцевая зона 3 (23–13 см) – Betula – Pinus.* Спорово-пыльцевая зона отличается новым увеличением обилия пыльцы березы и снижением обилия пыльцы сосен. Заметно уменьшается обилие пыльцы

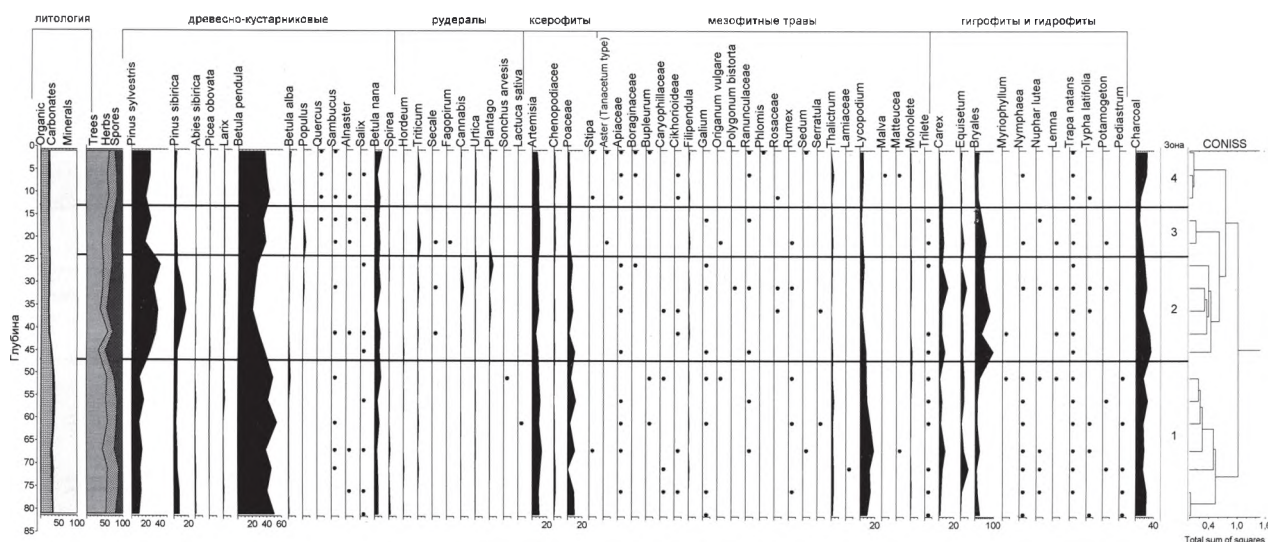


Рис. 10. Спорово-пыльцевая диаграмма 80 см керн озерных отложений озера Манжерокское Республики Алтай

кедра. Однако следует заметить, что хотя обилие пыльцы сосны лесной в этой зоне ниже, чем в предыдущей пыльцевой зоне, но все же больше, чем в пыльцевой зоне 1. Вновь возрастает обилие пыльцы ксерофитного комплекса – *Artemisia* и *Chenopodiaceae*. Больше становится видовое разнообразие пыльцы травянистых растений (30 типов). Из рудерально-сорного комплекса присутствует пыльца *Hordeum*, *Triticum*, *Secale*, *Fagopirum*, *Urtica*, *Plantago*. Резко снижается обилие пыльцы и спор водно-болотного комплекса: *Carex*, *Equisetum*, *Bryales*. Присутствует пыльца реликтового водного ореха (*Trapa natans*).

4. Спорово-пыльцевая зона 4 (13–0 см). Заключительная спорово-пыльцевая зона по составу региональных компонентов спектра практически идентична спорово-пыльцевой зоне 2, но выделяется кластерным анализом, вероятно, по резкому снижению обилия локального компонента, представленного группой *Bryales*. Также в поверхностном слое озерных отложений увеличивается обилие микрогольков.

Комплексная реконструкция палеоэкологических изменений озера Манжерокское и его окрестностей за последнее тысячелетие

Оценивая весь комплекс полученной палеоэкологической информации по верхнему 80-см слою донных отложений озера Манжерокское, мы реконструировали фазы развития растительности (на основе выделенных спорово-пыльцевых зон) в окрестностях указанного водоема и изменения локальных озерных условий (по диатомовым комплексам и локальным

компонентам спорово-пыльцевых спектров), а также геохимические процессы, происходившие на водосборном бассейне озера под воздействием антропогенного или климатического факторов (см. рис. 7, 10). Содержание химических элементов в донных отложениях озера Манжерокское приведено в таблице 2. На поступление тяжелых металлов в донные отложения водоемов значительное влияние оказывают окислительно-восстановительные условия (в первую очередь концентрация кислорода), величины pH, температура воды, концентрация органических и неорганических комплексообразователей, а также микробиологические процессы трансформации соединений элементов. Следует отметить, что определяющее влияние на концентрацию тяжелых металлов в донных отложениях оказывают pH условия [Папина, 2001]. Подкисление водоема может инициировать перераспределение металлов с поверхности частиц твердого вещества донных отложений или взвешенных веществ в водную толщу. Предложенная реконструкция величины pH (см. рис. 8) коррелирует с изменением концентраций металлов в донных отложениях Манжерокского озера. Максимальные концентрации металлов (Cu, Mn, Ni, Zn, Th) определены в слоях 35–36 и 40–41 см донных отложений, здесь же установлены более высокие значения величины pH. С понижением кислотности (уменьшение значений pH) происходит переход растворенных форм металлов из донных отложений в поровый раствор, а затем в водную толщу. Проведенные расчеты показали, что существует корреляционная зависимость концентрации металлов (Cu, Mn, Fe, Ni, Th, Zn) в донных отложениях озера Манжерокское с величиной pH,

Таблица 2. Содержание химических элементов в донных отложениях озера Манжерокское

Глубина	Элем.	Cu	Mn	Fe	Ni	Cd	Pb	Zn
		мкг/г	мкг/г	мкг/г	мкг/г	мкг/г	мкг/г	мкг/г
0–1		81,9	224	39003	61,5	0,64	20,1	149
5–6		91,3	229	46983	74,6	0,64	28,1	149
10–11		96,2	222	45668	69,3	0,55	20,5	149
15–16		99,1	207	48915	71,5	0,46	21,9	150
20–21		98,7	214	46673	61,8	0,31	19	142
25–26		106	223	48022	72,5	0,3	28,5	148
30–31		105	216	46763	73,5	0,27	10,3	145
35–36		124	228	46858	81,2	0,38	23,2	163
40–41		115	216	43568	74,7	0,36	7,99	142
44–45		99,9	199	42245	73,3	0,25	16,6	135
50–51		82,5	155	34235	65,5	0,19	9,12	109
55–56		83,5	150	35601	61,7	0,23	4,83	115
60–61		91,8	157	39544	65,8	0,22	13,2	121
65–66		100	169	40217	70,6	0,23	13,7	124
70–71		86,3	164	35427	57,2	0,23	9,66	113
75–76		96,7	160	37260	60,8	0,2	13	121
80–81		86,2	151	31070	53,2	0,22	9,62	103

коэффициент корреляции варьирует от 0,75 до 0,93, исключение составляют Pb, Cd и U. Наиболее активным, непосредственно участвующим в обменных процессах с поровой и придонной водой, является верхний слой донных отложений (0–10 см). В зависимости от гидрологических сезонов в нем могут превалировать либо окислительные ($Eh \geq -100$ мВ), либо восстановительные ($Eh \leq -100$ мВ) условия, которые определяют формы нахождения и содержания тяжелых металлов. В донных отложениях при анаэробных условиях вследствие процессов сульфат-редукции сероводорода происходит накопление сульфидов металлов. Сульфиды металлов Pb и Cd (халькофильные металлы) относятся к плохо растворимым в воде веществам и могут накапливаться в верхних слоях донных отложений. Наиболее высокие концентрации Pb в верхних слоях донных отложений озер связывают с образованием комплексных соединений с органическим веществом, окислами Fe и карбонатами [Koretsky et al., 2006].

1. Фаза березовой лесостепи (пыльцевая зона 1). В окрестностях озера Манжерокское существовала березовая лесостепь с польнейю и богатым разнотравьем. Сосна в ближайшем окружении озера не произрастала. Теплый и сухой климат, вероятно, способствовал понижению уровня озерных вод и эвтрофикации озера. О сокращении водного зеркала озера могут свидетельствовать обильные остатки болотного мха *Drepanocladus sentnerii*, обнаруженные в этой части озерного керна (табл. 1). Вероятно, они могли быть занесены в озеро от расширившихся болотистых окраин. В теплой и мелкой воде разрастались погруженные

и полупогруженные водные растения – гидрофиты (*Myriophyllum*, *Nymphaea*, *Nuphar lutea*, *Trapa natans*, *Potamogeton*, *Lemna*). Обмеление и закисление водоема стимулировало развитие в нем бентосных видов диатомей: *Eunotia diodon* и *E. formica*. Содержание исследуемого ряда химических элементов (Mn, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) в донных отложениях озера Манжерокское в эту фазу было значительно ниже, чем в более поздних фазах развития озера (табл. 2).

Судя по всему, в фазу березовой лесостепи озеро Манжерокское представляло собой эвтрофный мелководный водоем, меньший по площади, чем современное озеро, с обильной водной растительностью и диатомовыми комплексами, в которых доминировали бентосные формы. Водоем имел признаки естественной acidификации. Климат, вероятно, был теплее и суше современного. Эта фаза в развитии ландшафта и озера, скорее всего, предшествовала промышленной революции, что обусловило низкое содержание исследованных химических элементов в озерных отложениях.

2. Фаза березово-сосновых лесов (пыльцевая зона 2). В окрестностях озера Манжерокское появляются сосновые леса, а на более высоких гипсометрических уровнях гор распространяется кедр. В травяно-моховом покрове окружающих озеро лесов стало больше зеленых мхов. Палинологические данные указывают на то, что климат предгорий Алтая стал более влажным. Это подтверждается также независимыми данными диатомового анализа и химического анализа донных осадков этого интервала времени. Данная фаза началась резким увеличением обводненности озера за

счет усилившегося поверхностно-сточного питания, вероятно, вследствие увеличения количества годовых осадков. На это указывает доминирование бентосных видов диатомей, максимальные значения pH и всплеск содержания всех изученных химических элементов и микроугольков, приходящийся на этот период. Сапропелевые отложения предыдущей фазы, насыщенные остатками болотного мха *Drepanocladus sentnerii*, в фазе 2 сменяются гомогенным тонкодисперсным сапропелем (см. табл. 1). Это также указывает на смену болотно-водных растительных группировок более глубоководными аквальными сообществами организмов, сформировавших сапропель фазы 2. Присутствие пыльцы погруженно-водных растений (*Myriophyllum*) и растений глубоководной литорали (*Trapa natans*) говорит о том, что озеро было более полноводным. Резкое повышение глубины озера и интенсивный терригенный снос, вероятно, пагубно сказались на диатомовых комплексах прежде мелководного водоема. В результате резко упало обилие створок диатомовых водорослей. Следует отметить, что данное сокращение видового разнообразия диатомовых комплексов совпадает также с увеличением содержания Mn в донных осадках (см. табл. 2), что подтверждает аналогичную зависимость, выявленную для донных отложений устьевого части р. Лососинки в районе г. Петрозаводска [Рыбаков, Слукровский, 2012; Шелехова и др., 2013]. Кроме того, максимальное содержание Mn в донных осадках этой фазы сочетается с максимальным содержанием Cu, Cd и Zn. Катастрофическая смена диатомоценозов в результате изменения экологических условий началась уже с уровня 50–51 см, когда из них исчезли ацидофильные виды и массово размножились индифференты, и среди них – бентосные виды. В этом же слое отмечено максимальное обилие цист золотистых водорослей. После массовой вспышки обилия *Stauroneis anceps f. gracilis* диатомоценозы озера Манжерокское почти полностью деградировали. Лишь значительно позднее, после завершения фазы увлажнения климата, когда уровень озера и pH воды понизились, в нем сформировались новые диатомоценозы. Интересно, что увеличение содержания в озерных осадках элементов терригенного сноса в Уфимском озере на Южном Урале также сопровождалось отсутствием створок диатомей [Масленникова и др., 2014].

Другие особенности пыльцевых комплексов этой фазы включают присутствие пыльцы ольховника, сорных видов семейства астровых и лабазника. Не исключено, что данная фаза

в развитии ландшафта маркирует начало антропогенного воздействия на ландшафт, поскольку именно в эту фазу увеличивается обилие всех рудеральных видов: *Triticum*, *Secale*, *Cannabis*. Во вторую половину второй фазы формируется полоса эвтрофного осокового болота по берегам озера Манжерокское, на что указывает обилие пыльцы ивы, осоки, спор хвоща и зеленых мхов.

3. Фаза сосново-березовой лесостепи (пыльцевая зона 3). Начало этой фазы ознаменовалось уменьшением увлажненности климата, вследствие чего в горах Алтая сократились площади темнохвойных кедровых лесов, что отразилось на уменьшении обилия дальнезаносной пыльцы кедра до 1,5–4 % в спорово-пыльцевом спектре озера Манжерокское. В окрестностях озера меньшую роль стали играть сосновые леса и увеличилась роль березовой лесостепи. Однако теперь в лесостепной растительности, окружающей озеро Манжерокское, кроме березы присутствует и сосна лесная. Открытые пространства заняты полынно-разнотравной растительностью и сельскохозяйственными угодьями, на которых выращивают пшеницу, овес и гречиху (судя по составу найденной пыльцы). Вероятно, в течение этой фазы уровень воды в озере Манжерокском снизился относительно предыдущей фазы. Постепенная аридизация климата привела к резкому сокращению ранее обильного мохового покрова в лесах.

4. Заключительная фаза сосново-березовой антропогенно измененной лесостепи (пыльцевая зона 4). Уровень воды в озере Манжерокском повысился по сравнению с предыдущей фазой. Вследствие этого затопляется прибрежная болотная растительность, на что указывает сокращение обилия пыльцы осок, спор хвоща и зеленых мхов. Меньше становится в озере погруженно-водных растений *Trapa natans* и *Potamogeton*. Во флоре диатомовых комплексов озера Манжерокское доминирование бентосного вида *Eunotia diodon* сменяется доминированием планктонных видов *Aulacoseira italica*, *Cyclotella pseudostelligera* и *Cyclotella sp.* Для этой фазы характерны наиболее высокие концентрации Pb и Cd в колонке донных отложений Манжерокского озера, что может быть связано частично с образованием комплексных соединений с органическим веществом, окислами Fe и карбонатами в придонном слое воды, а частично – с антропогенным загрязнением. Как и в фазе 2, в заключительной фазе повышено содержание Mn, но в данном случае это не сочетается с падением видового разнообразия и обилия диатомовых

комплексов. Вероятно, резкое сокращение диатомоценозов (по видовому разнообразию и количеству створок) во время фазы 2 было связано не непосредственно с ингибирующим действием повышенного содержания Mn в осадках, а с действием комплекса гидрохимических факторов.

Выводы

1. Анализ данных по изменению видового состава и количества диатомовых комплексов в верхнем 80-см слое (керне) озерного сапропеля озера Манжерокское показал, что за время накопления данного слоя отложений происходили сукцессионные смены как отдельных видов диатомей, так и диатомоценозов озера в целом, свидетельствующие о существовании мелководного водоема во время отложения нижней трети озерного керна, резкого обводнения озера при накоплении средней части керна, постепенного снижения обводненности озера в верхней части озерных осадков и с новым подъемом воды в последние десятилетия.

2. Экологический анализ всех выявленных таксонов диатомовых водорослей в изученном слое сапропеля показал, что из видов с известными характеристиками в нем преобладают бентосные бореальные алкалофильные галофобные виды стоячих вод, что характерно для мелководных стоячих небольших по площади пресных озер, к которым и относится озеро Манжерокское. При этом среди них всегда преобладали индикаторы умеренно загрязненных и чистых вод.

3. Количество створок диатомей в исследованных слоях донных отложений озера изменялось в значительных пределах – от 0,08 до 74,88 млн ств./г. Почти полное выпадение диатомовых комплексов в слоях средней части керна свидетельствует о кардинальной смене экологических условий в водоеме в период накопления сапропеля этого уровня. Дополнительные индикаторы (возрастание обилия пыльцы мезофитного кедра и сокращение обилия пыльцы ксерофитных степных растений, и в частности полыни, увеличение содержания в донных осадках элементов терригенного сноса, исчезновение макроостатков болотного мха в сапропеле) указывают на резкое повышение уровня вод озера Манжерокское, вероятно, в результате увлажнения климата в период накопления слоя с глубины 31–41 см.

4. Реконструкция изменений pH по индикаторным видам диатомей показала, что за время накопления 80-см слоя сапропеля величина pH варьировала в пределах 6,09–6,96,

соответствуя слабокислой среде. Наблюдается постепенное увеличение величины pH от основания керна к поверхности с выраженным увеличением pH в средней части керна. Для Телецкого озера величина pH за последние 2000 лет изменялась в интервале 7,51–7,69, соответствуя слабощелочной среде. Сравнение динамик pH двух озер указывает на то, что в мелководном Манжерокском озере с течением времени условия менялись более кардинально, чем в глубоководном Телецком озере.

5. Резкое сокращение видового разнообразия диатомоценозов и их обилия во время более влажной фазы 2 было вызвано действием комплекса гидрохимических факторов.

6. Данные изменения локальных условий озера хорошо согласуются с изменением региональной увлажненности климата, выразившейся в сукцессиях суходольной растительности от березовой лесостепи к сосновым и кедровым лесам и затем к современной березово-сосновой антропогенно измененной лесостепи и в появлении пыльцы видов рудерального комплекса. Выявленная динамика растительности, климата и геохимии ландшафта исследуемого района несомненно отражает определенную периодичность в степени увлажнения западных предгорий и низкогорий Алтая. Ожидаемые радиоуглеродные датировки, а также детализация палеоэкологических и геохимических данных позволят установить точную хронологию выявленных рубежей и более детальную картину биогеохимических процессов, имевших место на западных предгорьях Алтая в последние тысячелетия и столетия нашей эры. За отсутствием таковых в настоящий момент мы можем лишь предположительно датировать 80-см керн донных отложений Манжерокского озера возрастом в 1000 лет по аналогии с датированными отложениями озера Дикое, расположенного в аналогичных низкогорных условиях восточных предгорий Кузнецкого Алатау [Бляхарчук, 2012]. В озере Дикое донные отложения с глубины 146 см (72 см + 74 см верхних полужидких осадков) имели возраст 2190 ± 70 лет, согласно АМС датировке, полученной в радиоуглеродной лаборатории университета Джорджии (США).

Авторы выражают глубокую благодарность Т. С. Папиной и П. А. Бляхарчуку за помощь в проведении полевых работ по бурению отложений озера Манжерокское, В. Н. Удачину за выполнение ряда геохимических анализов образцов, а также анонимному рецензенту за ценные замечания и советы по улучшению статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-04-00984а и 14-04-10054/к, а также средств в рамках гранта Постановления Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации № 14. В25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM).

Литература

- Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.
- Бляхарчук Т. А. Реконструкция лесной и высокогорно-степной растительности юго-западной части Тувы с позднеледниковья до современности // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 89–96.
- Бобров А. Е., Куприянова Л. А., Литвинцева М. В., Тарасевич В. Ф. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1983. 207 с.
- Гричук В. П., Заклинская Е. Д. Анализ ископаемой пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географиздат, 1948. 228 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). СПб.: Наука, 1992. Т. II, вып. 2. 125 с.
- Ильин В. В. Флора и растительность Манжерокского озера (Алтай) // Бот. журн. 1982. Т. 67, № 2. С. 210–220.
- Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И. и др. Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Советская наука, 1951. Вып. 4. 620 с.
- Красноборов И. М. и др. Определитель растений Республики Алтай. Новосибирск: СО РАН, 2012. 640 с.
- Куликовский М. С. История изучения флор диатомовых водорослей в сфагновых болотах России и некоторых сопредельных государств // Новости систематики низших растений. 2008. № 42. С. 36–54.
- Куминова А. В. Растительный покров Алтая / Отв. ред. В. В. Ревердатто. Новосибирск: Сиб. отд. АН СССР, 1960. 449 с.
- Куприянова Л. А. Палинология сережкоцветных. Л.: Наука, 1965. 215 с.
- Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры Европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 170 с.
- Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца двудольных растений флоры Европейской части СССР. Л.: Наука, 1978. 184 с.
- Курбатова С. А., Лаптева Н. А., Ершов И. Ю., Борисовская Е. В. Средообразующая роль гидрофитов в развитии и функционировании планктонных сообществ // Тр. Карельского НЦ РАН. 2013. № 3. С. 119–128.
- Масленникова А. В., Удачин В. Н., Дерягин В. В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 136 с.
- Митрофанова Е. Ю. Подледный фитопланктон мелководного Манжерокского озера, Горный Алтай, Россия // Мир науки, культуры и образования. 2009. № 5 (17). С. 16–19.
- Митрофанова Е. Ю., Сутченкова О. С. Диатомовые водоросли в донных отложениях глубокого озера Телецкое (Алтай, Россия) как индикаторы экологических условий в последние 2000 лет // Мир науки, культуры и образования. 2014. № 5 (48). С. 321–326.
- Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Каган Л. Я. Горные озера как индикаторы загрязнения воздуха // Водные ресурсы. 1997. Т. 23, № 5. С. 669–682.
- Огуреева Г. Н. Ботаническая география Алтая. М.: Наука, 1980. 188 с.
- Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения водных экосистем: анализ. обзор. Новосибирск: Наука, 2001. 58 с.
- Рыбаков Д. С., Слуковский З. И. Геохимические особенности загрязнения донных осадков зарегулированной городской реки // Учен. зап. Петргу, сер. Естеств. и техн. науки. 2012. № 4 (125). С. 67–73.
- Селедцов Н. Г. Айское, Манжерокское и Тенгинское озера Горного Алтая // Изв. Алт. отд. геогр. об-ва СССР. 1963. Вып. 2. С. 54–73.
- Смагин В. Н., Ильинская С. А., Назимов Д. И. и др. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- Цимбалей Ю. М. Экологические проблемы рекреационного освоения Манжерокского озера (Северный Алтай) // Мир науки, культуры, образования. 2008. № 2 (9). С. 22–26.
- Чернова Г. М., Михайлов Н. Н., Денисенко В. П., Козырева М. Г. Некоторые вопросы палеогеографии голоцена юго-западного Алтая // Изв. всесоюзного геогр. общ. 1991. Т. 123, вып. 2. С. 140–146.
- Шелехова Т. С., Рыбаков Д. С., Слуковский З. И. Оценка состояния водных экосистем в условиях урбанизации по диатомовым комплексам и концентрации химических элементов в донных осадках // Водные объекты города Петрозаводска. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 59–66.
- Эбель А. Л. Конспект флоры северо-западной части Алтае-Саянской провинции. Кемерово: КРЭОО Ирбис, 2012. 568 с.
- Andreev A. A., Pierau R., Kalugin I. et al. Environmental changes in the northern Altai during the last millennium documented in Lake Teletskoye pollen record // Quaternary Research. 2007. No 67. P. 394–399.
- Blyakharchuk T. A., Wright H., Borodavko P. S. et al. Late Glacial and Holocene vegetational changes on the Ulagan high-mountain plateau, Altai Mountains, southern Siberia // Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology. 2004. No 209. P. 259–279.
- Blyakharchuk T. A., Wright H., Borodavko P. S. et al. Late Glacial and Holocene vegetational history of the Altai Mountains (southwestern Tuva Republic, Siberia) // Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology. 2007, No 245. P. 518–534.
- Blyakharchuk T. A., Wright H., Borodavko P. S. et al. The role of pingos in the development of the Dzangyskol lake-pingo complex, central Altai Mountains, south-

ern Siberia // *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 2008, No 257. P. 404–420.

Hartley B. B., Barber H. G., Carter J. R. An Atlas of British Diatoms // Biopress Ltd., 1996. 601 p.

Heiri O., Lotter A. F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // *Journal of Paleolimnology*. 2001, No 25. P. 101–110.

Grimm E. Tilia. TGView Version 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collections Center, Springfield IL. 2004.

Koretsky C. M., Haas J. R., Miller D., Ndenga N. T. Seasonal variations in pore water and sediment geochemistry of littoral lake sediments (Asylum Lake, MI, USA). *Geochemical Transactions*, 2006. P. 7–11.

Mason I. M., Guzkoeska M. A., Rapley C. G. The response of lake levels and areas to climatic change // *Climate Change*. 1994, No 27. P. 161–197.

Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E. Pollen analysis. Second edition. London: Blackwell Science Ltd, 1997. 217 p.

Reille M. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du nord // *Vfresseille Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie*, 1995. 327 p.

Renberg J., Hellberg T. The pH history of lakes in south-western Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments // *AMBIO*. 1982. Vol. 11. P. 30–33.

Schlutz F., Lehmkuhl F. Climatic change in the Russian Altai, southern Siberia, based on palynological and geomorphological results, with implications for climatic teleconnections and human history since the middle Holocene // *Veget' Hist Archeobot*. 2007. No 16. P. 101–118.

Stefkova E. Diatom species composition in the sediment core of Plesne Lake (Bohemian Forest, Czech Republic) // *Silva Gabreta*. 2008. Vol. 14 (2). P. 73–84.

Westover K. S., Fritz S. C., Blyakharchuk T. A., Wright H. E. Diatom Paleolimnological record of the Holocene climatic and environmental change in the Altai Mountains, Siberia // *Journ. of Paleolimnology*. 2006. No 35. P. 519–541.

Wolin J. A., Stone J. R. Diatoms as indicators of water-level change in freshwater lakes // *The diatoms: applications to the environmental and earth sciences*. Cambridge: University Press, 2010. P. 174–185.

Поступила в редакцию 28.04.2015

References

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.

Blyakharchuk T. A. Rekonstruktsiya lesnoi i vysokogorno-stepnoi rastitel'nosti yugo-zapadnoi chasti Tuvy s pozdnelednikov'ya do sovremennosti [Reconstructing the vegetation of forest and alpine-steppe landscapes in the southwestern part of Tuva since the Late Glacial period till the present]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2008. No 1. P. 89–96.

Bobrov A. E., Kupriyanova L. A., Litvintseva M. V., Tarasevich V. F. Spory paprotnikoobraznykh i pyl'tsa golosemennykh i odnodol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR [Spores of pteridophytes and pollen of gymnosperms and monocotyledons from the flora of the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1983. 207 p.

Chernova G. M., Mikhailov N. N., Denisenko V. P., Kozyreva M. G. Nekotorye voprosy paleogeografii golotsena yugo-zapadnogo Altaya [Some questions of the Holocene paleogeography of southwestern Altai]. *Izv. vsesoyuznogo geogr. obshch.* [Proc. All-Union geogr. soc.]. 1991. Vol. 123, iss. 2. P. 140–146.

Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye) [Diatoms of the USSR (fossil and recent)]. St. Petersburg: Nauka, 1992. Vol. II, iss. 2. 125 p.

Ebel' A. L. Konspekt flory severo-zapadnoi chasti Altae-Sayanskoi provintsii [Synopsis of flora of the north-western part of the Altai-Sayan province]. Kemerovo: KREOO Irbis, 2012. 568 p.

Grichuk V. P., Zaklinskaya E. D. Analiz iskopaemoi pyl'tsy i spor i ego primenenie v paleogeografii [Analysis of fossil pollen and spores and its application in paleogeography]. Moscow: Geografizdat, 1948. 228 p.

Il'in V. V. Flora i rastitel'nost' Manzherokskogo ozera (Altai) [Flora and vegetation of Lake Manzherok (Altai)]. *Bot. zhurn.* [Bot. J.]. 1982. Vol. 67, No 2. P. 210–220.

Krasnoborov I. M. et al. Opredelitel' rastenii Respubliki Altai [Key to the plants of the Republic of Altai]. Novosibirsk: SO RAN, 2012. 640 p.

Kulikovskii M. S. Istoriya izucheniya flor diatomovykh vodoroslei v sfagnovykh bolotakh Rossii i nekotorykh sopredel'nykh gosudarstv [History of the study of diatom flora in the sphagnum dominated mires of Russia and some adjacent states]. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* [News of systematics of lower plants]. 2008. No 42. P. 36–54.

Kuminova A. V. Rastitel'nyi pokrov Altaya [Plant cover of the Altai region]. Ed. V. V. Reverdatto. Novosibirsk: Sib. otd. AN SSSR, 1960. 449 p.

Kupriyanova L. A. Palinologiya serezhkotsvetnykh [Palynology of the Amentiferae]. Leningrad: Nauka, 1965. 215 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa i spory rastenii flory Evropeiskoi chasti SSSR [Pollen and spores of plants from the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1972. Vol. 1. 170 p.

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pyl'tsa dvudol'nykh rastenii flory Evropeiskoi chasti SSSR [Pollen of dicotyledonous plants of the European part of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1978. 184 p.

Kurbatova S. A., Lapteva N. A., Ershov I. Yu., Borisovskaya E. V. Sredoobrazuyushchaya rol' gidrofitov v razvitiy i funktsionirovaniy planktonnykh soobshchestv [Environmental role of hydrophytes in development and functioning of planktonic communities]. *Tr. Karelskogo NTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2013. No 3. P. 119–128.

Maslennikova A. V., Udachin V. N., Deryagin V. V. Paleokologiya i geokhimiya ozerno sedimentatsii

golotsena Urala [Paleoecology and geochemistry of Holocene lake sedimentation in the Urals]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN, 2014. 136 p.

Mitrofanova E. Yu. Podlednyi fitoplankton melkovodnogo Manzherokskogo ozera, Gornyyi Altai, Rossiya [Under-ice phytoplankton of shallow Lake Manzherokskoye, the Altai Mountains, Russia]. *Mir nauki, kul'tury i obrazovaniya* [The world of science, culture and education]. 2009. No 5 (17). P. 16–19.

Mitrofanova E. Yu., Sutchenkova O. S. Diatomovye vodorosli v donnykh otlozheniyakh glubokogo ozera Teletskoe (Altai, Rossiya) kak indikator ekologicheskikh uslovii v poslednie 2000 let [Diatom algae in the bottom sediments of Lake Teleskoye (Altai, Russia) as indicators of environmental conditions during the last 2000 years]. *Mir nauki, kul'tury i obrazovaniya* [The world of science, culture and education]. 2014. No 5 (48). P. 321–326.

Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Kagan L. Ya. Gornyye ozera kak indikator zagryazneniya vozdukh [Mountain lakes as markers of air pollution]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 1997. Vol. 23, No 5. P. 669–682.

Ogureeva G. N. Botanicheskaya geografiya Altaya [Botanical geography of the Altai]. Moscow: Nauka, 1980. 188 p.

Papina T. S. Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v ryadu: voda – vzheshennoe veshchestvo – donnye otlozheniya vodnykh ekosistem: analit. obzor [Transport and peculiarities of heavy metals distribution in the row: water – suspended substance – bottom sediments of aquatic ecosystems. Analyt. rev.]. Novosibirsk: Nauka, 2001. 58 p.

Rybakov D. S., Slukovskii Z. I. Geokhimicheskie osobennosti zagryazneniya donnykh osadkov zaregulirovannoi gorodskoi reki [Geochemical characteristics of contaminated bottom sediments of regulated urban river]. *Uchen. zap. PetrGU*, ser. Estestv. i tekhn. nauki [Proc. PetrSU. Series: Natural and engineering sciences]. 2012. No 4 (125). P. 67–73.

Seledtsov N. G. Aiskoe, Manzherokskoe i Tenginskoe ozera Gornogo Altaya [Aiskoe, Manzherokskoe and Tenginskoe Lakes of the Altai Mountains]. *Izv. Alt. otd. geogr. ob-va SSSR* [Proc. Alt. Br. Geogr. Soc.]. 1963. Iss. 2. P. 54–73.

Smagin V. N., Il'inskaya S. A., Nazimov D. I., Novosel'tsev I. F., Cherednikova Yu. S. Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri [Forest types of the South Siberia mountains]. Novosibirsk: Nauka, 1980. 336 p.

Tsimbalei Yu. M. Ekologicheskie problemy rekreatsionnogo osvoeniya Manzherokskogo ozera (Severnyi Altai) [Ecological problems of recreation development of Lake Manzheroksk (North Altai)]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya* [The world of science, culture and education]. 2008. No 2 (9). P. 22–26.

Shelekhova T. S., Rybakov D. S., Slukovskii Z. I. Otsenka sostoyaniya vodnykh ekosistem v usloviyakh urbanizatsii po diatomovym kompleksam i kontsentratsii khimicheskikh elementov v donnykh osadkakh [Assessment of urbanized aquatic ecosystems based on diatom complexes and trace element concentrations in bottom sediments]. *Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk* [Water bodies of Petrozavodsk]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. P. 59–66.

Zabelina M. M., Kiselev I. A., Proshkina-Lavrenko A. I. et al. Diatomovye vodorosli. Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR [Diatoms. Key to freshwater algae of the USSR]. Moscow: Sovetskaya nauka, 1951. Iss. 4. 620 p.

Andreev A. A., Pierau R., Kalugin I., Daryin A. V., Smolyaninova L. G., Diekmann B. Environmental changes in the northern Altai during the last millenium documented in Lake Teletskoye pollen record. *Quaternary Research*. 2007, No 67. P. 394–399.

Blyakharchuk T. A., Wright H., Borodavko P. S., van der Knaap W. O., Ammann B. Late Glacial and Holocene vegetational changes on the Ulagan high-mountain plateau, Altai Mountains, southern Siberia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 2004, No 209. P. 259–279.

Blyakharchuk T. A., Wright H., Borodavko P. S., van der Knaap W. O., Ammann B. Late Glacial and Holocene vegetational history of the Altai Mountains (southwestern Tuva Republic, Siberia). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 2007, No 245. P. 518–534.

Blyakharchuk T. A., Wright H., Borodavko P. S., van der Knaap W. O., Ammann B. The role of pingos in the development of the Dzangyskol lake-pingo complex, central Altai Mountains, southern Siberia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 2008, No 257. P. 404–420.

Hartley B. B., Barber H. G., Carter J. R. An Atlas of British Diatoms. *Biopress Ltd.*, 1996. 601 p.

Heiri O., Lotter A. F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. 2001, No 25. P. 101–110.

Grimm E. Tilia. TGView Version 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collections Center, Springfield IL. 2004.

Koretsky C. M., Haas J. R., Miller D., Ndenga N. T. Seasonal variations in pore water and sediment geochemistry of littoral lake sediments (Asylum Lake, MI, USA). *Geochemical Transactions*, 2006. P. 7–11.

Mason I. M., Guzkoeska M. A., Rapley C. G. The response of lake levels and areas to climatic change. *Climate Change*. 1994, No 27. P. 161–197.

Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E. Pollen analysis. Second edition. London: Blackwell Science Ltd, 1997. 217 p.

Reille M. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du nord. *Vfrseille Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie*, 1995. 327 p.

Renberg J., Hellberg T. The pH history of lakes in south-western Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments. *AMBIO*. 1982. Vol. 11. P. 30–33.

Schlutz F., Lehmkuhl F. Climatic change in the Russian Altai, southern Siberia, based on palynological and geomorphological results, with implications for climatic teleconnections and human history since the middle Holocene. *Veget' Hist Archeobot*. 2007. No 16. P. 101–118.

Stefkova E. Diatom species composition in the sediment core of Plesne Lake (Bohemian Forest, Czech Republic). *Silva Gabreta*. 2008. Vol. 14 (2). P. 73–84.

Westover K. S., Fritz S. C., Blyakharchuk T. A., Wright H. E. Diatom Paleolimnological record of the Holocene climatic and environmental change in the Altai Mountains, Siberia. *Journ. of Paleolimnology*. 2006. No 35. P. 519–541.

Wolin J. A., Stone J. R. Diatoms as indicators of water-level change in freshwater lakes. *The diatoms: applications to the environmental and earth sciences*. Cambridge: University Press, 2010. P. 174–185.

Received April 28, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бляхарчук Татьяна Артемьевна

ведущий научный сотрудник, д. б. н.
Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН
Академический пр., 10/3, Томск, Россия, 634055
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
пр. Ленина, 36, Томск, Россия, 634050
эл. почта: tarun5@rambler.ru

Митрофанова Елена Юрьевна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656038
эл. почта: emit@iwep.ru

Эйрих Алла Николаевна

старший научный сотрудник, к. т. н.
Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Алтайский край,
Россия, 656038
эл. почта: tanya.papina@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Blyakharchuk, Tatiana

Institute of monitoring of climatic and ecological systems,
Siberian branch, Russian Academy of Sciences
10/3 Akademicheskoy Pr., 634055 Tomsk, Russia
National Research Tomsk State University
36 Lenin St., 634050 Tomsk, Russia
e-mail: tarun5@rambler.ru

Mitrofanova, Elena

Institute for water and environmental problems,
Siberian branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: emit@iwep.ru

Eirikh, Alla

Institute for water and environmental problems,
Siberian branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russia
e-mail: tanya.papina@mail.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.114.679:004.6 (470.22)

БАЗА ДАННЫХ «РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ОЗ. ВЕНДЮРСКОГО ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ» И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

**Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов, Н. И. Пальшин,
А. В. Митрохов, Г. Г. Гавриленко, А. Ю. Тержевик**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Обширные многолетние ледовые и радиационные наблюдения, проводившиеся на озере Вендюрском в 1995–2013 гг., были обобщены в виде базы данных «Радиационный режим оз. Вендюрского по результатам многолетних наблюдений» (св-во о гос. регистрации № 2014620152 от 20 января 2014 г.). База данных представляет собой набор связанных таблиц, содержащих сведения о радиационном режиме и оптических свойствах снежно-ледяного покрова озера. В базу включены фотографии поверхности озера, образцов озерного льда. Структура базы позволяет строить разнообразные запросы для анализа радиационного режима озера и оптических свойств снежно-ледяного покрова, оценки степени ослабления солнечной радиации в толще снега и льда в зависимости от состояния поверхности озера. База данных может быть использована в научных целях гидрологами, гидрофизиками, а также в учебных целях как наглядный материал для студентов географических и гидрометеорологических специальностей вузов.

Ключевые слова: база данных; мелководное озеро; радиационный режим; снежно-ледяной покров; альbedo; прозрачность.

**G. E. Zdorovennova, R. E. Zdorovennov, N. I. Palshin, A. V. Mitrokhov,
G. G. Gavrilenko, A. Yu. Terzhevik. DATABASE «RADIATION REGIME OF
LAKE VENDYURSKOE: RESULTS OF LONG-TERM OBSERVATIONS» AND
ITS POTENTIAL APPLICATIONS**

Extensive multi-year ice and radiation observations conducted on Lake Vendyurskoe in 1995–2013 were summarized in the database «Radiation regime of Lake Vendyurskoe: Results of long-term observations» (Certificate of state registration No 2014620152, date of registration 20 January 2014). The database is a set of interlinked tables containing information on the radiation regime and the optical properties of the snow and ice cover of Lake Vendyurskoe. The database includes photographs of the lake surface and lake ice samples. The structure of the database allows for a variety of queries to be made

for analyzing the radiation regime of the lake. The main objectives of the database are analysis of the radiation regime of the lake and the optical properties of the snow and ice cover, assessment of solar radiation attenuation in snow and ice depending on the state of the lake surface. The database can be used for research purposes by hydrologists, hydrophysics, as well as for training purposes as visual material in geographical and meteorological universities.

Key words: database; shallow lake; radiation regime; snow and ice cover; albedo; transparency.

Введение

Известно, что толщина и оптические свойства снежно-ледяного покрова определяют подледную освещенность в озерах [Чехин, 1987]. Солнечная радиация становится основным источником энергии в мелководных озерах в конце периода ледостава. По мере таяния снега и льда уменьшается альbedo поверхности, поток солнечной радиации на нижней границе льда растёт, развивается конвективное перемешивание, играющее важную роль в формировании термической структуры и перераспределении растворенных (кислород, биогены) и взвешенных (планктон) веществ по водной толще озера [Kelley, 1997; Jonas et al., 2003; Тержевик и др., 2010]. Изменчивость альbedo по площади озера весной может достигать 40 % [Петров и др., 2005], что оказывает существенное влияние на формирование пространственной неоднородности подледного температурного поля и может способствовать развитию адвективного переноса подо льдом [Kirillin, Terzhevik, 2011]. Весной, по мере таяния, одновременно с уменьшением толщины снега и льда происходят изменения их плотности, текстуры и структуры. Это приводит к значительной изменчивости их оптических свойств во времени и пространстве и требует накопления большого количества разнообразных натуральных данных для параметризации радиационных процессов в толще снежно-ледяного покрова.

Измерения потоков солнечной радиации на поверхности снежно-ледяного покрова и нижней границе льда, а также изучение оптических свойств снега и льда проводились ежегодно в течение почти 20 лет в 1995–2013 гг. на мелководном озере Вендюрском, расположенном на юге Карелии. Результаты исследований были опубликованы в виде технических отчетов [Malm et al., 1996, 1997a, b] и статей в ряде ведущих отечественных и зарубежных журналов [Петров и др., 2005; Здоровеннов и др., 2010; Leppäranta et al., 2010; Zdorovenov et al., 2013; Zdorovenova et al., 2013]. За годы исследований накоплен огромный массив

сведений о радиационном и ледовом режимах озера. В связи с этим целью работы было создание и государственная регистрация базы данных по радиационному режиму и оптическим свойствам снежно-ледяного покрова озера Вендюрского на основе результатов многолетних наблюдений. База данных «Радиационный режим оз. Вендюрского по результатам многолетних наблюдений» прошла государственную регистрацию (св-во о гос. регистрации № 2014620152 от 20 января 2014 г.). Тип ЭВМ: персональная, СУБД: MS Access 2013, ОС: Microsoft Windows 7 Professional, объем базы данных: 54.3 Мб.

База данных может использоваться широким кругом специалистов – гидрологов, гидрофизиков, метеорологов при изучении многолетней изменчивости радиационного и ледового режима озер бореальной зоны. Создание такой базы данных является важной и актуальной задачей, поскольку информационный поиск на сайте ФИПС (<http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS>) показал, что в настоящее время нет зарегистрированных баз данных по радиационному режиму бореальных озер.

Материалы и методы

Объект исследования – мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное в южной части Карелии (62°10′–62°20′N, 33°10′–33°20′E) (рис. 1). Площадь зеркала озера 10,4 км², объем вод ~5,5·10⁷ м³, средняя глубина 5,3 м, максимальная 13,4 м, площадь водосборного бассейна 82,8 км². Коэффициент водообмена озера равен 0,4 год⁻¹. Прозрачность воды по диску Секки 3–4 м.

Ледовый режим озера Вендюрского. Как показывают многолетние наблюдения, замерзает водоем в первой половине ноября – начале декабря, разрушение льда происходит в первой половине мая, продолжительность ледостава 5–6,5 месяца [Петров и др., 2006; Ефремова и др., 2010; Zdorovenov et al., 2013]. Максимальной толщины (0,4–0,8 м) снежно-ледяной покров достигает к концу марта [Петров

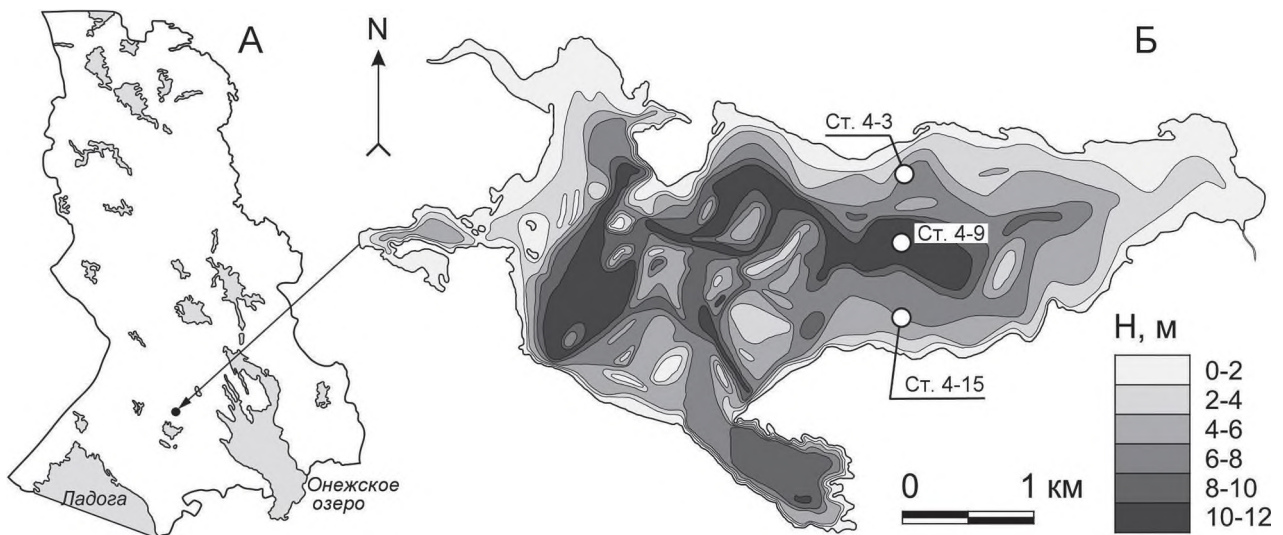


Рис. 1. Положение озера Вендюрского на карте Карелии (А), батиметрия озера и положение станций измерения радиации (Б)

и др., 2005; Здоровеннов и др., 2010; Zdrovenpova et al., 2013] и имеет обычно многослойную структуру, включающую слои снега, белого и кристаллического льда, между которыми зачастую наблюдается прослойка влажного снега. Многослойная структура льда является типичной для малых бореальных озер [Lerpäranta, Kosloff, 2000; Ashton, 2011].

Описание измерений. Измерения солнечной радиации на поверхности снежно-ледяного покрова озера и на нижней границе льда проводились в зимние месяцы 1995–2013 гг. На льду озера размещалась радиационная станция. Измерение потоков падающей и отраженной солнечной радиации на поверхности снежно-ледяного покрова проводилось с использованием пиранометров «Star-shaped pyranometer» немецкой фирмы «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme». Пиранометры были укреплены на специальной конструкции на высоте около одного метра над поверхностью льда. Поток солнечной радиации на нижней границе льда измерялся с помощью универсального пиранометра М80-м, произведенного в России. Подледный пиранометр был закреплен на обладающей положительной плавучестью платформе и помещен на расстояние около 1,5 м от лунки непосредственно под нижнюю границу льда. Дискретность измерений радиации пиранометрами составляла 1–5 минут. В указанный период на станции ежедневно осуществлялся замер толщины снежно-ледяного покрова с помощью гидрологической рейки. Начиная с апреля 2005 г. в период измерений проводилась фотосъемка поверхности льда, образцов озерного льда, выпиленных из ледяного покрова, радиационной станции.

Обычно станция радиационных измерений размещалась на льду вблизи северного берега озера на расстоянии около 300 м от береговой черты (ст. 4–3), однако в апреле 2007 г. станция была установлена в центральной части озера (ст. 4–9) (рис. 1). В апреле–мае 1998 г. проводились синхронные измерения радиации на двух станциях, расположенных вблизи южного и северного берега (ст. 4–3 и ст. 4–15).

Измерения радиации ежегодно проводились весной в период с середины апреля до начала мая в течение 2–13 суток (табл.). Кроме того, были проведены измерения в начале зимнего сезона (в ноябре и декабре 1995 г.), в середине и конце зимы (в марте 1996 г., январе, феврале и марте 2002 г.). Таким образом, измерениями были охвачены начало, середина и конец ледостава.

Структура базы данных

База данных включает в себя четыре связанные между собой таблицы, содержащие информацию о станциях (таблица «STATIONS»), периодах и дискретности измерений (таблица «MEASUREMENTS»), данные измерений потоков солнечной радиации (таблица «DATA_RAD»), а также фотографии поверхности озера, станций измерений и образцов озерного льда (таблица «ФОТО») (рис. 2).

Таблица «DATA_RAD», помимо данных измерений потоков падающей, отраженной и проникающей под лед солнечной радиации, включает значения альбедо поверхности озера (α) и прозрачности льда (τ), рассчитанные по формулам:

Периоды измерений потоков солнечной радиации на радиационной станции в 1995–2013 гг. с указанием дискретности измерений

№	Станция	Начало измерений	Конец измерений	Интервал измерений
1	4-3	13.04.1995	23.04.1995	5 мин
2	4-3	27.11.1995	29.11.1995	2 мин
3	4-3	27.12.1995	27.12.1995	2 мин
4	4-3	25.03.1996	27.03.1996	4-5 мин
5	4-3	18.04.1996	25.04.1996	4-5 мин
6	4-3	14.04.1997	27.04.1997	2 мин
7	4-3	28.04.1998	04.05.1998	2 мин
8	4-15	01.05.1998	04.05.1998	2 мин
9	4-3	14.04.1999	24.04.1999	2 мин
10	4-3	13.04.2000	24.04.2000	2 мин
11	4-3	28.01.2002	30.01.2002	2 мин
12	4-3	10.02.2002	11.02.2002	2 мин
13	4-3	23.03.2002	25.03.2002	2 мин
14	4-3	17.04.2002	24.04.2002	2 мин
15	4-3	19.04.2003	26.04.2003	2 мин
16	4-3	18.04.2004	28.04.2004	2 мин
17	4-3	16.04.2005	25.04.2005	2 мин
18	4-3	16.04.2006	27.04.2006	1 мин
19	4-9	13.04.2007	19.04.2007	1 мин
20	4-3	12.04.2008	20.04.2008	1 мин
21	4-3	21.04.2009	28.04.2009	1 мин
22	4-3	17.04.2010	19.04.2010	1 мин
23	4-3	17.04.2011	21.04.2011	1 мин
24	4-3	11.04.2012	24.04.2012	1 мин
25	4-3	20.04.2013	24.04.2013	1 мин

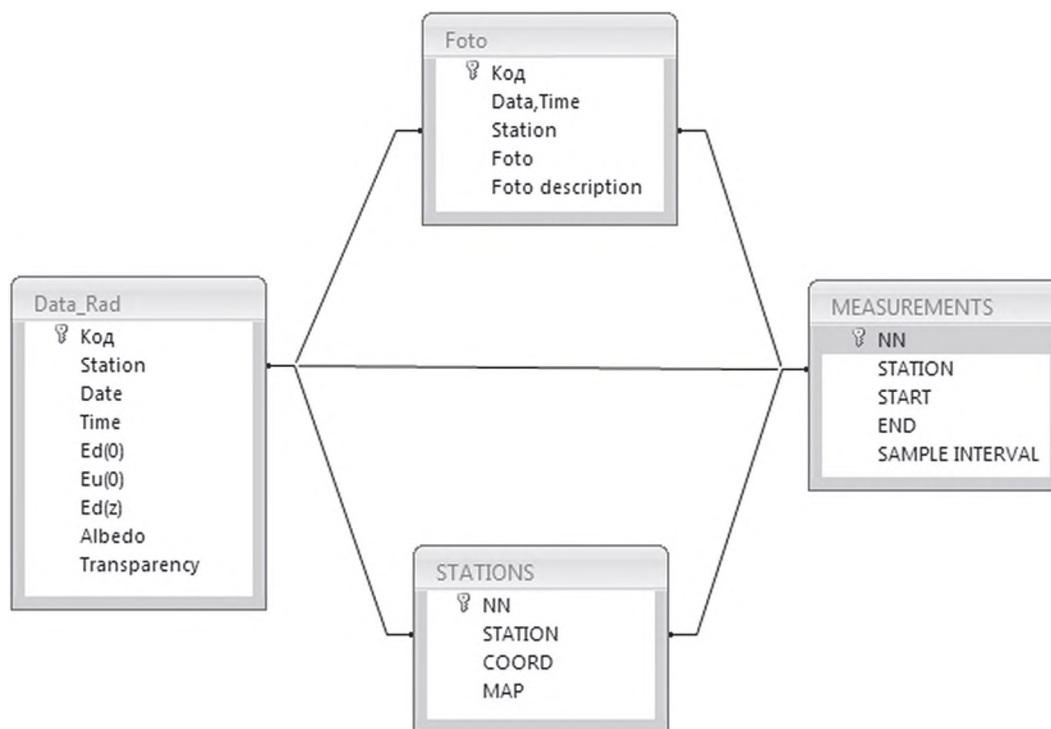


Рис. 2. Схема связи таблиц в базе данных

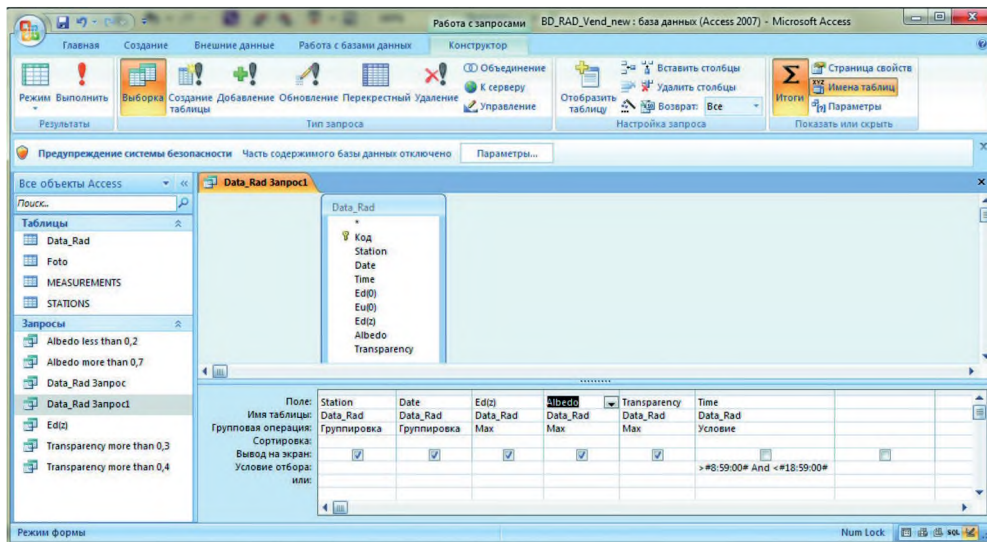


Рис. 3. Запрос на выборку максимальных значений альбеда, прозрачности льда и подледной радиации в период с 9 ч утра до 19 ч вечера, открытый в режиме конструктора

$$\alpha = \frac{E_u(0)}{E_d(0)}, \quad (1)$$

и

$$\tau = \frac{E_d(z)}{(1-\alpha)E_d(0)}, \quad (2)$$

где E – поток солнечной радиации ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$); индексы d и u обозначают падающую (downwelling) и отраженную (upwelling) радиацию; 0 – поверхность снежно-ледяного покрова, z – нижняя граница льда.

Работа с базой данных. Структура базы позволяет строить разнообразные запросы для анализа радиационного режима озера и оптических свойств снежно-ледяного покрова, оценки степени ослабления солнечной радиации в толще снега и льда в зависимости от состояния поверхности.

Например, для проведения совместного анализа временной динамики альбеда поверхности и прозрачности льда создается запрос на поиск максимальных значений названных параметров в период с 9 ч утра до 18 ч вечера каждого дня измерений. Выборка формируется из таблицы «DATA_RAD». На рис. 3 показан запрос на выборку, открытый в режиме конструктора.

Переход из режима конструктора в режим сводной диаграммы позволяет визуализировать полученные в результате выборки данные. На рис. 4 в качестве примера приведена изменчивость максимальных значений альбеда и прозрачности льда в апреле 1995 и 1996 гг. на станции 4–3.

Изменяя условия запроса, можно находить средние, максимальные, минимальные значения параметров за выбранные промежутки времени, изучать их внутрисуточную, синоптическую и межгодовую динамику, а также анализировать пространственную изменчивость оптических характеристик поверхности и снежно-ледяного покрова озера.

Экспорт выборки, например, в пакет Excel позволяет проводить расширенный анализ данных. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты регрессионного анализа зависимости прозрачности льда от альбеда поверхности (см. рис. 5, А) и потока подледной радиации от прозрачности льда (см. рис. 5, Б), выполненные в пакете Excel.

Анализ базы данных позволил установить, что при высоких значениях альбеда (0,9 и более) прозрачность льда не превышает 0,1, при значениях альбеда менее 0,2 прозрачность льда составляет 0,35–0,55, то есть 35–55 % потока солнечной радиации, проходящей через поверхность льда, достигает его нижней границы. При значениях альбеда от 0,2 до 0,9 прозрачность льда изменяется в широком диапазоне от 0,1 до 0,5, поскольку зависит не только от состояния поверхности, но и от структуры, текстуры и толщины слоев снежно-ледяного покрова.

При величине прозрачности менее 0,2 поток солнечной радиации на нижней границе льда не превышает $50 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ и может достигать $200 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при увеличении прозрачности до 0,6.

Запросы, содержащие выборки максимальных значений потоков падающей и отраженной солнечной радиации на верхней границе

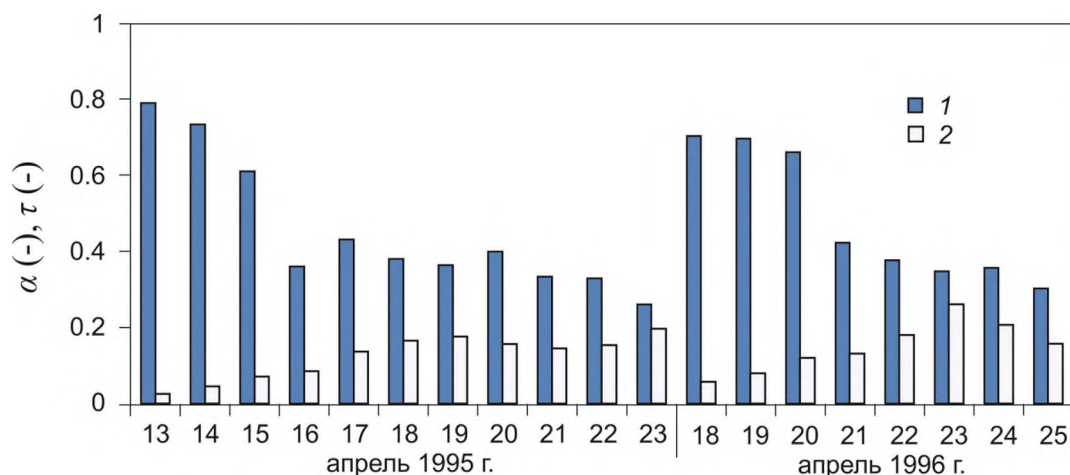


Рис. 4. Изменчивость дневных максимумов альbedo поверхности и прозрачности льда озера Вендюрского в период с 13 по 23 апреля 1995 г. и с 18 по 25 апреля 1996 г. 1 – альbedo, 2 – прозрачность льда

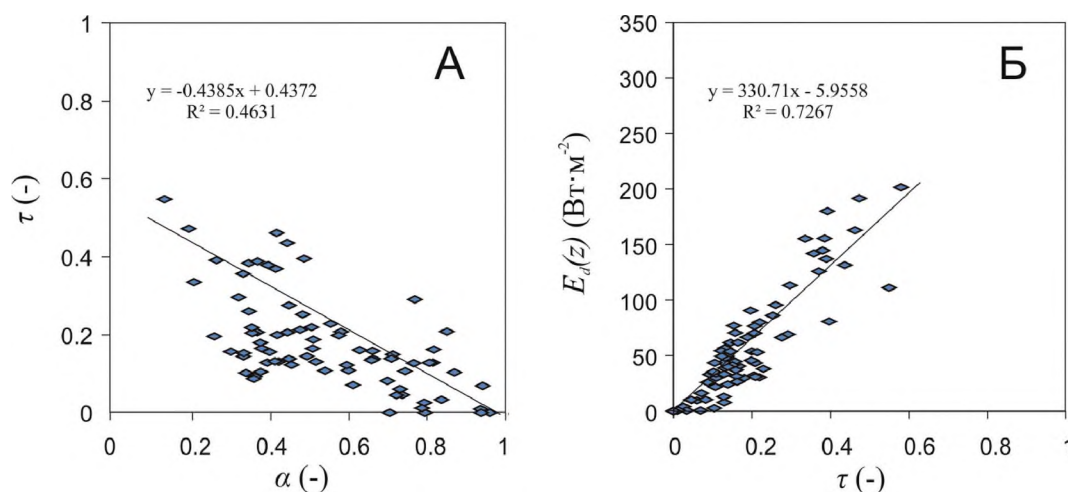


Рис. 5. Зависимость прозрачности льда от альbedo поверхности (А) и потока подледной радиации от прозрачности льда (Б) в середине–конце апреля 1995–1997, 1999–2000, 2002–2003 гг. и начале мая 1998 г.

снежно-ледяного покрова и подледной радиации, показывают, что в середине апреля названные параметры изменяются в пределах 500–800 и 200–500 Вт·м⁻² соответственно.

Полученные в ходе многолетних исследований радиационного режима озера Вендюрского диапазоны изменчивости альbedo, прозрачности льда, потоков солнечной радиации в подледном слое неплохо согласуются с данными отечественных и зарубежных исследователей по измерениям на бореальных озерах [Bolsenga, 1969; Arst et al., 2006, 2008; Lei et al., 2011].

Таким образом, созданная база данных, содержащая обширный массив сведений о радиационном режиме малого озера, может быть использована в научных целях гидрологами, гидрофизиками, в моделях ледяного покрова, а также в учебных целях как наглядный материал для студентов географических и гидрометеорологических специальностей вузов.

Авторы глубоко признательны рецензентам за ценные советы и конструктивную критику, позволившие существенно улучшить структуру статьи.

Литература

Ефремова Т. В., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И. Ледовый режим озер Карелии // Водная среда: обучение для устойчивого развития. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2010. С. 31–40.

Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Тержевик А. Ю. Межгодовая изменчивость снежно-ледового покрова озера Вендюрского // Актуальные проблемы экологии: тезисы докл. IV Межд. науч.-практ. конф. (Гродно, Беларусь, 27–29 октября 2010 г.) Гродно: ГрГУ, 2010. С. 229–231.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И. и др. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 546–554.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Чехин Л. П. Световой режим водоемов. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 130 с.

Arst H., Erm A., Leppäranta M., Reinart A. Radiative characteristics of ice-covered fresh- and brackish-water bodies // Proc. of the Estonian Academy of Sciences, Geology. 2006. Vol. 55 (1). P. 3–23.

Arst H., Erm A., Herlevi A. et al. Optical properties of boreal lake water in Finland and Estonia // Boreal Env. Research. 2008. Iss. 13. P. 133–158.

Ashton G. D. River and lake ice thickening, thinning and snow ice formation // Cold Reg. Sci. Technol. 2011. Iss. 68. P. 3–19.

Bolsenga S. J. Total albedo of Great Lakes ice // Water Resour. Res. 1969. 5 (5). P. 1132–1133, doi:10.1029/WR005i005p01132.

Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A. Radiatively driven convection in an ice-covered lake investigated by using temperature microstructure technique // J. Geophys. Res. 2003. 108:18. doi: 200310.1029/2002JC001316.

Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension // J. Plankton. Res. 1997. Iss. 19. P. 1859–1880.

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in fresh-water lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation // Cold Reg. Sci. and Technol. 2011.

Iss. 65. P. 184–190. doi: 10.1016/j. coldregions. 2010.08.010

Lei R., Leppäranta M., Erm A. et al. Field investigations of apparent optical properties of ice cover in Finnish and Estonian lakes in winter 2009 // Estonian J. of Earth Sciences. 2011. 60 (1). P. 50–64.

Leppäranta M., Kosloff P. The thickness and structure of Lake Pääjärvi ice // Geophysica. 2000. Iss. 36. P. 233–248.

Leppäranta M., Terzhevik A., Shirasawa K. Solar radiation and ice melting in Lake Vendyurskoe, Russian Karelia // Hydrology Research. 2010. Vol. 41, No 1. P. 50–62.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995 / Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund, 1996. No. 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during Winter 1995/1996 / Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997a. No. 3213. 203 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regime in three shallow ice-covered lakes. Heat and mass fluxes // Nordic Hydrology. 1997b. Vol. 28. P. 129–152.

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenнова G. et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // Est. J. of Earth Sci. 2013. 61(1). P. 26–32.

Zdorovenнова G., Zdorovenov R., Palshin N., Terzhevik A. Optical properties of the ice cover on Vendyurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012) // Annals of Glaciology. 2013. 54 (62). P. 121–129.

Поступила в редакцию 02.02.2015

References

Chekhin L. P. Svetovoi rezhim vodoemov [Light regime in water bodies]. Petrozavodsk: Karel'skii filial AN SSSR, 1987. 130 p.

Efremova T. V., Zdorovenнова G. E., Pal'shin N. I. Ledovyi rezhim ozer Karelii [Karelian lakes ice regime]. Vodnaya sreda: obucheniye dlya ustoichivogo razvitiya [Aquatic environment. Education for sustainable development]. Petrozavodsk: KarRC of RAS. 2010. P. 31–40.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenнова G. E. Pogloshcheniye solnechnoi radiatsii snezhno-ledovym pokrovom ozer [Absorption of solar radiation by snow-and-ice cover of lakes]. Vodnye resursy [Water resour.]. 2005. Vol. 32, No 5. P. 546–554.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenнова G. E. Osobennosti termicheskoi struktury melkovodnogo ozera v nachale zimy [The thermal structure of a shallow lake in early winter]. Vodnye Resursy [Water resour.]. 2006. Vol. 33, No 2. P. 154–162.

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovenнова G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Gidro-

fizicheskie aspekty formirovaniya kislородnogo rezhima melkovodnogo ozera, pokrytogo l'dom [Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow lake covered with ice]. Vodnye resursy [Water resour.]. 2010. Vol. 37, No 5. P. 568–579.

Zdorovenov R. E., Zdorovenнова G. E., Terzhevik A. Yu. Mezhdodovaya izmenchivost' snezhno-ledovogo pokrova ozera Vendyurskogo [Interannual variability of snow and ice cover of Lake Vendyurskoe]. Aktual'nye problemy ekologii: tezisy dokl. IV Mezhd. nauch.-prakt. konf. (Grodno, Belarus', 27–29 oktyabrya 2010 g.) [Actual ecological problems. Abstr. rept. The 4th intern. sci. and pract. conf. (Grodno, Belorussia 27–29 October, 2010)]. Grodno: GrGU, 2010. P. 229–231.

Arst H., Erm A., Leppäranta M., Reinart A. Radiative characteristics of ice-covered fresh- and brackish-water bodies. Proc. of the Estonian Academy of Sciences, Geology. 2006. 55 (1). P. 3–23.

Arst H., Erm A., Herlevi A., Kutser T., Leppäranta M., Reinart A., Virta J. Optical properties of boreal lake water in Finland and Estonia. Boreal Env. Research. 2008. Iss. 13. P. 133–158.

Ashton G. D. River and lake ice thickening, thinning and snow ice formation. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011. Iss. 68. P. 3–19.

Bolsenga S. J. Total albedo of Great Lakes ice. *Water Resour. Res.* 1969. 5 (5). P. 1132–1133, doi:10.1029/WR005i005p01132.

Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A. Radiatively driven convection in an ice-covered lake investigated by using temperature microstructure technique. *J. Geophys. Res.* 2003. 108:18. doi: 200310.1029/2002JC001316.

Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension. *J. Plankton. Res.* 1997. Iss. 19. P. 1859–1880.

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation. *Cold Reg. Sci. and Technol.* 2011. Iss. 65. P. 184–190. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.08.010

Lei R., Leppäranta M., Erm A., Jaatinen E., Parn O. Field investigations of apparent optical properties of ice cover in Finnish and Estonian lakes in winter 2009. *Estonian J. of Earth Sciences.* 2011. 60 (1). P. 50–64.

Leppäranta M., Kosloff P. The thickness and structure of Lake Pääjärvi ice. *Geophysica.* 2000. Iss. 36. P. 233–248.

Leppäranta M., Terzhevik A., Shirasawa K. Solar radiation and ice melting in Lake Vendurskoe, Rus-

sian Karelia. *Hydrology Research.* 2010. Vol. 41, No 1. P. 50–62.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, University of Lund, 1996. No. 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, University of Lund, 1997a. No. 3213. 203 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt content regime in three shallow ice-covered lakes. Heat and mass fluxes. *Nordic Hydrology.* 1997b. Vol. 28. P. 129–152.

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. of Earth Sci.* 2013. 61 (1). P. 26–32.

Zdorovenova G., Zdorovenov R., Palshin N., Terzhevik A. Optical properties of the ice cover on Vendurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012). *Annals of Glaciology.* 2013. 54 (62). P. 121–129.

Received February 02, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здорovenнова Галина Эдуардовна

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики, к. г. н.

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com
тел.: 89116660369

Здорovenнов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики, к. г. н.

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: 89212209438

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики, к. г. н.

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: npalshin@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: 89116660369

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: 89212209438

Palshin, Nikolay

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru

Гавриленко Галина Геннадиевна

и. о. младшего научного сотрудника лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: south.sun.cr@gmail.com
тел.: 89602115561

Митрохов Андрей Васильевич

главный гидробиолог лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com

Тержевик Аркадий Юрьевич

зав. лабораторией гидрофизики, к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: ark1948@list.ru

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: south.sun.cr@gmail.com
tel.: 89602115561

Mitrokhov, Andrey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1948@list.ru

УДК 556.55: 51 (470.22)

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНФИГУРАЦИИ ОЗЕР КАРЕЛИИ

В. В. Меншуткин

Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

Рассмотрено использование методов фрактального анализа применительно к озерам Карелии, для которых имеется надежный и высококачественный фактический материал. Показано, что наиболее надежные статистические связи существуют между фрактальной размерностью и коэффициентом развития береговой линии.

Ключевые слова: озера; береговая линия; фракталы.

V. V. Menshutkin. FRACTAL ANALYSIS OF CONFIGURATION OF LAKES IN KARELIA

The application of fractal analysis methods for studying the lakes in Karelia for which we possess reliable and high-quality factual evidence is considered in the paper. It is indicated that the most reliable correlations exist between a fractal dimension and coastline development coefficient.

Keywords: lakes; coastline; fractals.

Введение

Методы фрактального анализа в последнее время получают широкое распространение в географических [Пузаченко, 1997; Яцевич и др., 2004; Мельник, 2007] и экологических [Галашвили и др., 2007] исследованиях. В основополагающей работе Бенуа Мандельброта [2002] в качестве примера приводилось исследование фрактальной структуры береговой линии Великобритании и Норвегии. В настоящей работе развито именно это приложение применительно к озерам Карелии, для которых имеется надежный и высококачественный фактический материал [Озера..., 2013].

Методы и результаты

Для вычисления фрактальной размерности разработана компьютерная программа с графическим вводом, которая определяет

фрактальную размерность методом наложения сеток [Федер, 1994]. Применение более сложного программного обеспечения [например Громов и др., 2002; Пшеничников, 2004] в данном случае нецелесообразно. На рис. 1 показано, как с увеличением масштаба измерения сокращается число квадратов сетки, необходимое для покрытия исследуемой линии контура берегов озера. Угол наклона этой регрессии в логарифмических координатах и определяет величину фрактальной размерности.

На рис. 2 представлены контуры береговой линии некоторых исследованных озер в том виде, в котором они вводились в компьютерную программу.

В таблице показаны результаты определения фрактальной размерности береговой линии 23 озер Карелии по данным картографического материала, приведенного в справочнике «Озера Карелии» [2013]. Из рассмотренных водоемов наименьшую фрактальную размерность

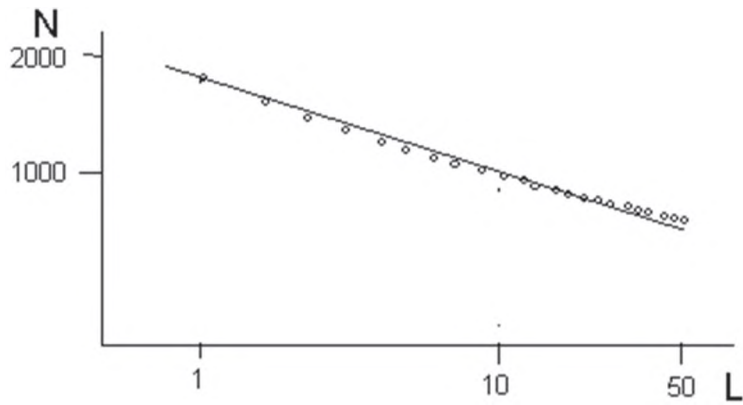


Рис. 1. Зависимость между масштабом измерения (L) и длиной береговой линии озера (N) в логарифмических координатах (по данным для озера Кереть)



Рис. 2. Примеры контуров береговой линии озер, которые использовались при определении их фрактальной размерности

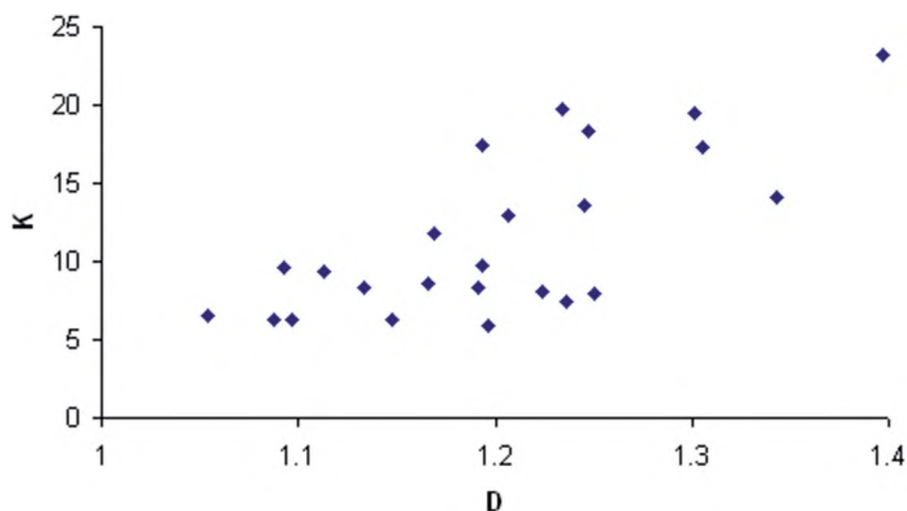


Рис. 3. Соотношение между фрактальной размерностью береговой линии озер и коэффициентом развития береговой линии, вычисленным по площади (S) и длине береговой линии (L)

Характеристики некоторых озер Карелии

	D	P	B	F	K
Пелдожское	1,054	118	0,3	2	6,53
Пряжинское	1,088	156	3,34	3	6,27
Укшозеро	1,093	47	9,7	4	9,64
Шотозеро	1,097	27	0,43	9	6,30
Янисъярви	1,113	24	0,92	7	9,40
Ведлозеро	1,133	50	2,15	12	8,30
Логмозеро	1,148	43	4,37	10	6,23
Святозеро	1,166	159	2,9	5	8,58
Ладога	1,169	76	3,2	12	11,80
Пяозеро	1,191	18	1,25	10,6	8,34
Сегозеро	1,193	16	0,41	6	9,74
Нюозеро	1,193	23	0,49	3	17,43
Лижемское	1,196	14	0,81	2	5,96
Водлозеро	1,207	64	4,6	8	12,93
Шуезеро	1,224	25	2,24	2	8,06
Каменное	1,234	13	0,74	7	19,80
Сула	1,236	16	0,71	5	7,49
Мунозеро	1,245	21	5,8	6	13,54
Онего	1,247	15	6,6	10	18,36
Каскеснаволоок	1,250	21	1,21	2	7,97
Выгозеро	1,301	26	1,21	3	19,49
Топозеро	1,305	24	0,72	8	17,27
Тикшеозеро	1,343	10	0,36	6	14,04
Кереть	1,397	62	0,3	7	23,17

Примечание. D – фрактальная размерность; P – первичная продукция в гС м² год⁻¹; B – биомасса макрозообентоса в г м⁻²; F – рыбопродуктивность в кг га⁻¹; K – развитие береговой линии, $K = L / \sqrt{S}$, где L – длина береговой линии, S – площадь озера

имеет оз. Пелдожское, а наибольшую – оз. Кереть. Попытки установить статистические связи между фрактальной размерностью и некоторыми другими характеристиками озер показали, что наиболее надежная связь существует с коэффициентом развития береговой линии (рис. 3). Подобная связь (коэффициент линейной корреляции 0,745) вполне оправдывается самим понятием фрактальности как меры

плотности заполнения площади фигуры ее бесконечно усложняющимся контуром.

Связи фрактальной размерности с другими характеристиками озер оказались менее значимыми, чем в случае с коэффициентом развития береговой линии. Например, с ростом фрактальной размерности первичная продукция фитопланктона озера сокращается, а рыбопродуктивность остается статистически не

зависимой от исследуемой величины. Однако такие исследования выходят за рамки данного сообщения, цель которого заключается только в том, чтобы обратить внимание на возможность определения еще одной морфометрической характеристики озера. Эта характеристика может быть использована при классификации озер Карелии, поскольку учитывает такие свойства конфигурации озера, которые невозможно учесть другими средствами.

Выводы

В статье представлены результаты использования методов фрактального анализа на примере ряда типичных озер Карелии, по которым имеется достоверная база данных [Озера..., 2013]. Расчеты показали, что наиболее тесные статистические связи существуют между фрактальной размерностью озер и коэффициентом развития береговой линии. Отметим, что для больших озер, таких как Ладожское и Онежское, имеющих сложную морфометрию, обладающих большим разнообразием характера берегов (сравните, например, шхерный северный берег Ладоги и южный берег того же озера), вычисление общей фрактальной размерности для всего озера вряд ли целесообразно, и поэтому для таких озер предварительно следует провести классификационные исследования очертания берегов.

References

- Feder E. Fraktaly [Fractals]. Moscow.: Mir, 1994. 354 p.
- Galashvili D. B., Pukhnareva D. A., Iudin D. I. Strukturnaya organizatsiya i fraktal'naya priroda makrozoobentosa mal'nykh gorodskikh vodoemov [Structural organization and fractal nature of macrozoobenthos of small urban water bodies]. *Privolzhskii ekologicheskii zhurnal [Privolzhskiy Journal of Ecology]*. 2007. No 1. P. 3–15.
- Gromov Yu. Yu., Zemskoi N. A., Ivanova O. G., Lagutin A. V., Tyutyunik V. M. Fraktal'nyi analiz i protsessy v komp'yuternoi seti [Fractal analysis and processes in computer networks]. Tambov: Tambovsk. un-t, 2002. 106 p.
- Mandel'brot B. Fraktal'naya geometriya prirody [The fractal geometry of nature]. Moscow: In-t komp'yuternykh issledovaniy, 2002. 646 p.
- Mel'nik M. A. Fraktal'nyi analiz izvilistosti rek (na primere Tomskoi oblasti) [Fractal analysis of river sinuosity (example of Tomsk Region)]. 2007. URL: <http://sun.tsu.ru/mminfo/00063155> (accessed 25.12.2014).

Литература

- Галашвили Д. Б., Пухнарева Д. А., Иудин Д. И. Структурная организация и фрактальная природа макрозообентоса малых городских водоемов // *Приволжский экологический журнал*, 2007, № 1. С. 3–15.
- Громов Ю. Ю., Земской Н. А., Иванова О. Г. и др. Фрактальный анализ и процессы в компьютерной сети. Тамбов: Тамбовск. ун-т, 2002. 106 с.
- Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 646 с.
- Мельник М. А. Фрактальный анализ извилистости рек (на примере Томской области). 2007. URL: <http://sun.tsu.ru/mminfo/00063155> (дата обращения: 25.12.2014).
- Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1994. 354 с.
- Пузаченко Ю. Г. Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // *Вестник МГУ*, 1997, № 1. Сер. 5.
- Пшеничников А. Е. Автоматизированный морфометрический анализ географических объектов по снимкам и картам при тематической картографии: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2004. 138 с.
- Яцевич С. Е., Иванов В. К., Ефимов В. Б. и др. Фрактальный анализ изображений морских льдов. URL: www.d33.infospace.ru (дата обращения: 25.12.2014).

Поступила в редакцию 18.01.2015

- Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference Book]. Eds. N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. 464 p.
- Puzachenko Yu. G. Prilozhenie teorii fraktalov k izucheniyu struktury landshafta [Application of fractal theory to the study of landscape structure]. *Vestnik MGU [MSU Herald]*. 1997. No 1, Ser. 5.
- Pshenichnikov A. E. Avtomatizirovanniy morfometricheskii analiz geograficheskikh ob'ektov po snimkam i kartam pri tematicheskoi kartografii [Automated morphometric analysis of geographical objects by images and maps in thematic cartography]: dis. ... kand. geograf. nauk [PhD Diss. (Geogr.)]. Moscow, 2004. 138 p.
- Yatsevich S. E., Ivanov V. K., Efimov V. B., Tsimbal V. N., Pashchenko R. E. Fraktal'nyi analiz izobrazhenii morskikh l'dov [Fractal analysis of sea ices images]. www.d33.infospace.ru (accessed 25.12.2014).

Received January 18, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**Меншуткин Владимир Васильевич**

главный научный сотрудник, д. б. н., проф.
Санкт-Петербургский экономико-математический
институт РАН
ул. Сызранская, 28-1, Санкт-Петербург, Россия, 191187
эл. почта: menshutkina. n@gmail.com

CONTRIBUTOR:**Menshutkin, Vladimir**

St. Petersburg Institute for Economics and Mathematics,
Russian Academy of Sciences
28-1 Syzranskaya St., 191187 St. Petersburg, Russia
e-mail: menshutkina. n@gmail.com

УДК 551.577 (470.22)

АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ В КАРЕЛИИ

Л. Е. Назарова

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Представлена характеристика режима атмосферных осадков на территории Карелии, составленная по современным данным в сравнении с климатическими нормами 1961–1990 гг. Показаны основные тенденции изменений таких климатических показателей, как годовые и месячные суммы осадков и число дней с осадками различной интенсивности.

Ключевые слова: климатические нормы; годовые и месячные суммы осадков; день с осадками.

L. E. Nazarova. PRECIPITATION OVER THE TERRITORY OF KARELIA

In the present paper, the precipitation regime over Karelia is described relying on modern data as compared to the climatic norms for the period 1961–1990. The main trends in annual and monthly total precipitation and the number of days with precipitation of various intensity are considered.

Key words: climatic norm; annual and monthly precipitation; day with precipitation.

Введение

Важным метеорологическим элементом являются атмосферные осадки. Знание климатологии атмосферных осадков необходимо для различных аспектов жизнедеятельности человека (сельское хозяйство, энергетика и транспорт, опасные гидрометеорологические явления, связанные с наводнениями и засухами, и др.) и собственно для климатической системы (облачность, потоки скрытого тепла, приток пресной воды в океан, аккумуляция ледовых щитов и горных ледников и т. д.) [Груза, Ранькова, 2004]. Изучение динамики элементов водного баланса, одним из которых являются атмосферные осадки, оценка их изменчивости под влиянием естественных и антропогенных факторов представляет собой сложную научную задачу и имеет важное практическое

значение для охраны водных объектов и их рационального использования.

Однако оценки, касающиеся изменений количества осадков, существенно менее надежны, чем аналогичные оценки для температуры воздуха. Это вызвано как трудностями непосредственно инструментальных измерений (в особенности твердых осадков в зимний период), так и неоднородностью рядов наблюдений на метеорологических станциях, связанных с изменениями наблюдательной практики. Кроме того, существенно меньшая, по сравнению с полями температуры, пространственная связанность полей осадков делает менее надежными оценки регионально-осредненных величин.

Во «Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» [2014 г.] отмечается, что за период 1936–2010 гг.

практически на всей европейской части России, а также в Центральной Сибири наблюдается увеличение годовых сумм атмосферных осадков. Коэффициент линейного тренда составляет 0,3 мм/месяц за 10 лет. В Западной и Восточной Сибири, в Прибайкалье, Забайкалье, Приамурье и Приморье преобладают площади с отрицательными значениями трендов. В работе Э. Г. Богдановой с соавторами [2010] показано, что к 2000 году на всей европейской части России выделяется область увеличения осадков с максимальными значениями на севере Кольского полуострова, достигающими более 40 % среднего многолетнего количества осадков, или 240 мм за 65 лет. Данные, приведенные в работе Н. Н. Филатова с соавторами [2012], также говорят о росте количества выпадающих атмосферных осадков на территории Карело-Кольского региона. Изменения в режиме выпадения осадков на водосборе Онежского озера в условиях меняющегося климата рассмотрены автором ранее [Назарова, 2010]. Наиболее полная и подробная характеристика режима атмосферных осадков на территории республики дана в работе А. А. Романова [1961]. Осадки на территории отдельных районов Карелии подробно проанализированы в работах «Климат Петрозаводска» [1982] и «Климат Сортавалы» [1988]. Характеристика современных изменений в режиме выпадения атмосферных осадков на территории Карелии приведена в данной работе.

Материалы и методы

Для составления характеристики режима атмосферных осадков на территории Карелии в работе использованы данные многолетних наблюдений на станциях и постах Северо-Западного территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период от начала наблюдений на станциях до 2013 года.

Полученные ряды данных о суточных, месячных и годовых суммах атмосферных осадков и числе дней с осадками различной интенсивности в зависимости от задач исследования подвергались статистической обработке.

Результаты и обсуждение

В среднем за год на территории Карелии, относящейся к зоне избыточного увлажнения, выпадает 550–750 мм осадков. Годовое их количество возрастает в направлении с севера на юг. Однако на распределение осадков большое влияние оказывают орографические

особенности местности и характер подстилающей поверхности, ведущие к нарушению плавного хода изменения количества осадков. Довольно заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов, таких как Белое море, озера Ладожское, Онежское, Топозеро, Пяозеро и т. д. В районе побережья Белого моря в границах Карелии отмечаются наименьшие в республике годовые суммы осадков (450–550 мм). Равнинная, покатая к Белому морю территория побережья в средней и северной части покрыта огромными массивами болот, открыта для воздействия ветров на значительные расстояния, вплоть до возвышенностей западной Карелии. При таких условиях рельефа влияние Белого моря сказывается здесь в смягчении среднегодовых температур воздуха, а также в создании минимума осадков в северной приморской полосе. Летом Белое море холоднее суши, и воздух, поступающий с моря на сушу, нагревается и при этом не только не выделяет свою влагу, а, напротив, поглощает влагу, образовавшуюся на суше [Романов, 1961].

На протяжении года осадки распределены неравномерно – их количество за теплый период (май–октябрь) колеблется от 350 до 400 мм, за холодный – 150–350 мм. Максимальное количество осадков на большей части республики приходится на июль–август, иногда на сентябрь. В эти месяцы их выпадает от 70 (по северной Карелии) до 80–90 мм (по остальной территории). Жидкие осадки отмечаются в каждом месяце и составляют 60–65 % от годовой суммы, твердые осадки составляют 24–25 %, смешанные – 10–15 % годовых значений.

Анализируя многолетние данные наблюдений за атмосферными осадками, можно сделать вывод, что к началу XXI века годовые суммы осадков увеличились по всей территории Карелии. С начала 1990-х годов в основном преобладают положительные аномалии. На рисунке 1 представлены значения годовых сумм осадков в виде отклонений от климатической нормы (1961–1990) по данным наблюдений метеостанций (МС) Петрозаводск и Калевала. Обращает на себя внимание тот факт, что годовые суммы осадков в 2014 году в южных районах Карелии были ниже средних многолетних значений на 20–30 % (рис. 1, а). В центральных и северных районах количество осадков превышало климатическую норму примерно на 10–30 %.

Увеличение годовых сумм осадков привело к изменению средних многолетних значений, рассчитанных за продолжительные периоды. Согласно данным, приведенным

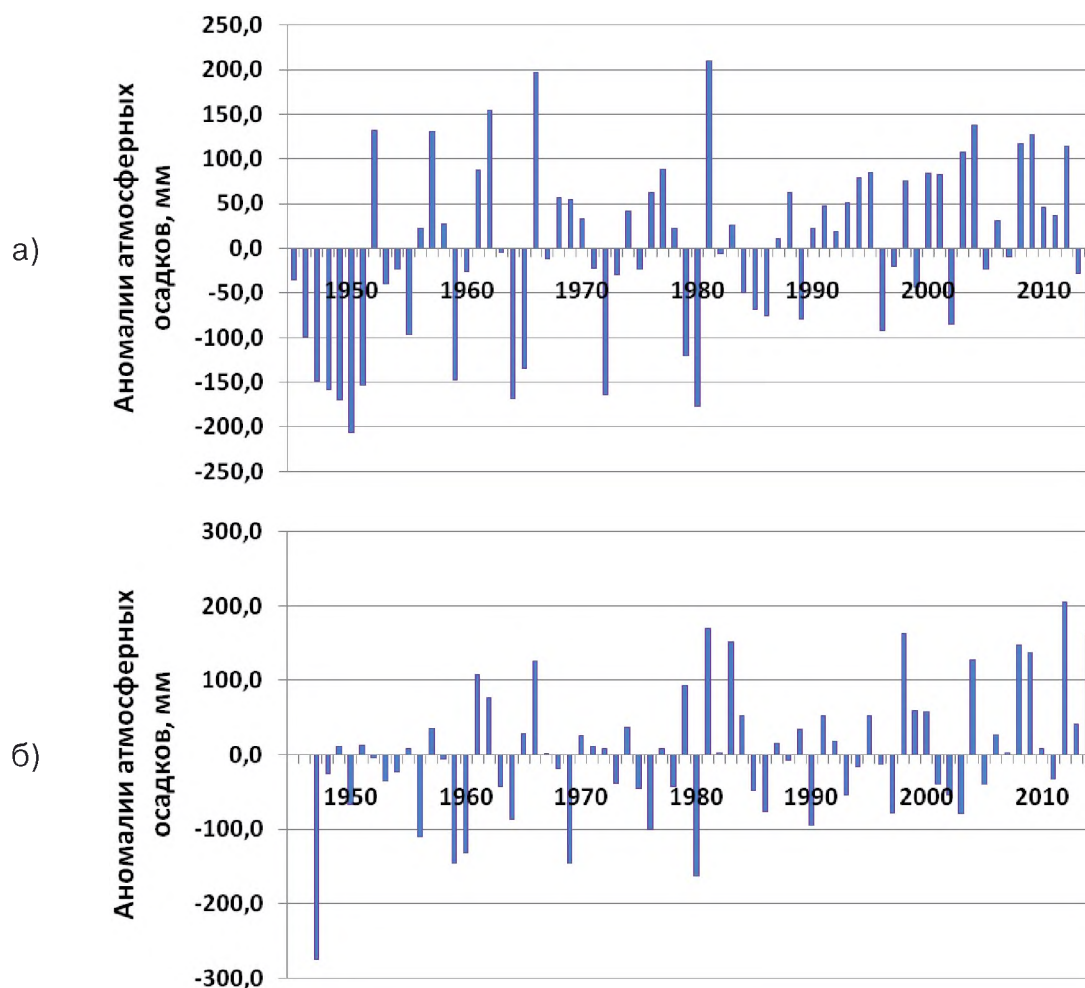


Рис. 1. Отклонения от нормы (1961–90 гг.) годовых сумм атмосферных осадков по данным МС Петрозаводск (а) и Калевала (б) за 1945–2014 гг.

Таблица 1. Средние годовые суммы атмосферных осадков, мм

Метеорологическая станция	Период осреднения	
	1961–1990	1991–2013
Энгозеро	539	614
Калевала	539	567
Кемь-порт	464	514
Гридино	411	456
Колежда	532	580
Паданы	530	561
Сегежа	582	632
Медвежьегорск	665	727
Кондопога	560	601
Пудож	686	698
Петрозаводск	578	618
Сортавала	601	655
Олонец	687	719

в таблице 1, средние за 1991–2013 гг. годовые суммы превышают климатические нормы на 20–70 мм.

Выполненные ранее оценки возможных изменений в режиме атмосферных осадков для территории Карелии и Кольского полуострова

[Сало и др., 2004; Назарова, 2010] в течение первой половины XXI века с использованием результатов численного моделирования на модели ЕНСАМ4/ОРУС3 показали, что суммы осадков в средних многолетних значениях могут возрасти на 20–50 мм в условиях

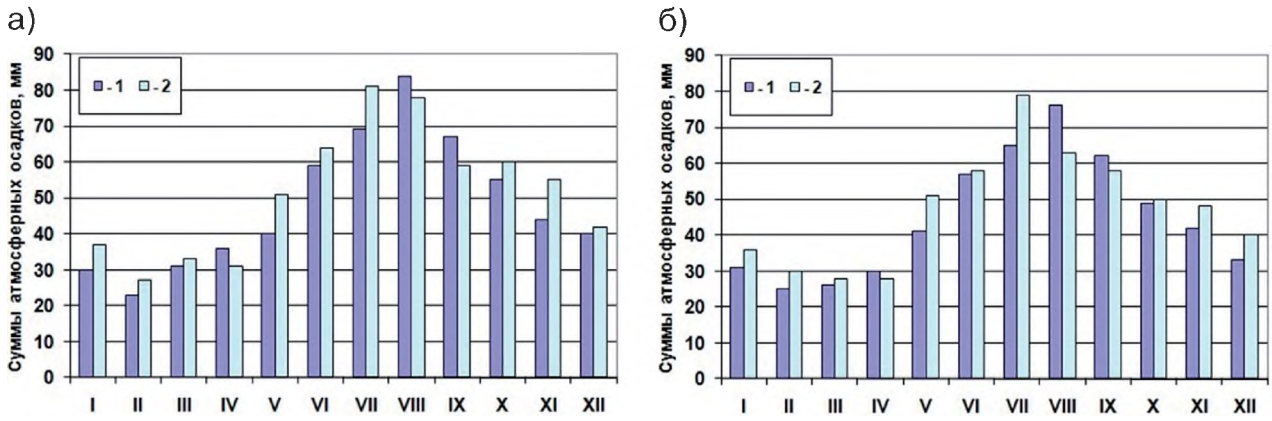


Рис. 2. Средние месячные суммы атмосферных осадков за 1961–1990 гг. (1) и 1991–2013 гг. (2) по данным наблюдений МС Петрозаводск (а) и Калевала (б)

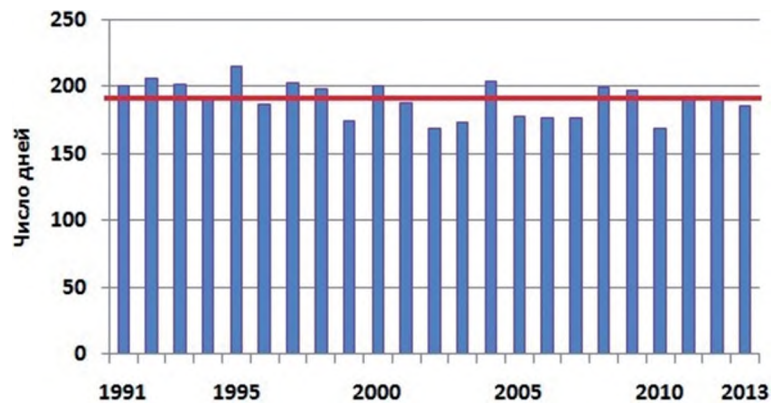


Рис. 3. Число дней с осадками выше 0,1 мм (МС Петрозаводск)

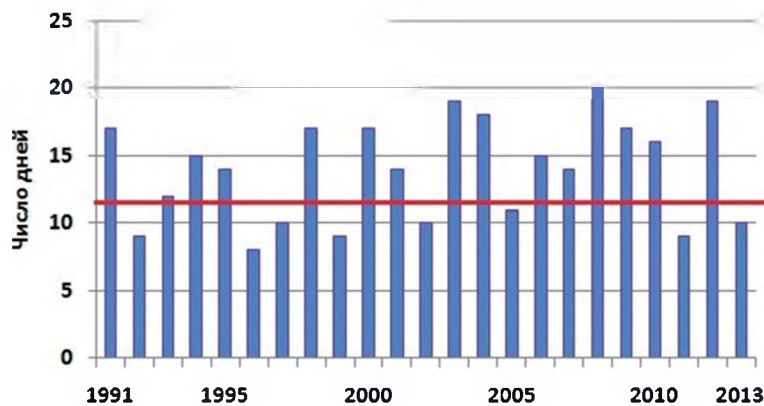


Рис. 4. Число дней с осадками более 10 мм (МС Петрозаводск)

меняющегося климата, что хорошо согласуется с наблюдаемыми изменениями (табл. 1). В работе С. А. Кондратьева с соавторами [2008] показано, что если изменения климата на территории Карелии в XXI веке будут происходить в соответствии со сценариями модели ЕНСАМ4/ОРУС3, то можно ожидать существенное внутригодовое перераспределение атмосферных осадков. До 30 % возрастут осенние и зимние осадки. Весенние осадки практически

не изменятся, а уменьшение летних осадков достигнет 18 % по отношению к периоду тестирования модели (1951–2000 гг.).

Анализ изменчивости количества выпадающих осадков по месяцам показал, что в основном на территории Карелии отмечается рост сумм атмосферных осадков во все сезоны года (рис. 2). Исключение составляют апрель, август и сентябрь, когда средние значения за 1991–2013 годы несколько ниже климатических

Таблица 2. Число дней с осадками различной интенсивности

Станция	1961–1990 гг.		1991–2013 гг.	
	≥ 0,1 мм	≥ 10,0 мм	≥ 0,1 мм	≥ 10,0 мм
Калевала	198	9	202	11
Кемь-порт	181	7	177	9
Реболы	199	11	198	11
Паданы	190	9	189	11
Петрозаводск	200	12	191	14
Сортавала	181	13	184	15

норм. Наибольшее увеличение месячных сумм осадков характерно для января, июля и ноября.

В отдельные годы месячные суммы осадков могут значительно отклоняться в ту или иную сторону от многолетних величин. Например, в июле 1973 года в Юшкозере выпало 0,0 мм осадков за месяц при климатической норме 66 мм; станция Петрозаводск в сентябре 1970 года зарегистрировала месячную сумму осадков 182,1 мм при норме 77 мм.

Величина суточных максимумов количества осадков также может быть довольно значительной. Так, в Пудоже в июле 1965 г. за сутки выпало 110,7 мм осадков (двухмесячная норма), а в июле 1993 г. в д. Черный Порог Сегежского района было отмечено выпадение 89,6 мм осадков за 12 часов.

При изучении изменений и изменчивости климата важной частью является учет интенсивности, частоты и продолжительности выпадения атмосферных осадков.

Поскольку годовые суммы атмосферных осадков повсеместно увеличиваются, особый интерес вызывает режим выпадения осадков. Анализ данных о суточных суммах атмосферных осадков дает возможность отметить значительную изменчивость этих величин внутри каждого месяца, что объясняется определяющим влиянием в этом временном масштабе особенностей атмосферной циркуляции с достаточно активной циклонической деятельностью.

Общее число дней с осадками более 0,1 мм в Карелии составляет 193–212 за год. Наибольшее их число отмечается в холодный период года – с октября по февраль (до 20–25 дней за месяц), но число дней с сильными (10,0 мм и более) осадками в это время года невелико – менее 1 дня за месяц. В течение весны и летнего сезона общее число дней с осадками уменьшается до 13–18, но возрастает число дней с осадками более 1,0 и 5,0 мм за день, хотя продолжительность выпадения осадков за сутки обычно невелика. Анализ данных о числе дней с осадками за 1961–2013 гг. позволил сделать следующие выводы. В течение 1991–2013 годов общее число дней с осадками 0,1 мм и более в основном было ниже нормы,

рассчитанной за 1961–1990 гг., или соответствовало ей (рис. 3).

В работе С. М. Семенова [2009] отмечается аналогичная тенденция для значительной территории европейской части РФ. «При практически повсеместном увеличении годовой суммы осадков доля суток с суммой осадков, превышающих 0,1 мм, на обширных территориях уменьшилась».

В то же время анализ данных о сильных (10 и более мм за сутки) осадках позволяет говорить о том, что в течение 1991–2013 гг. число дней с сильными осадками в большинстве случаев превышало климатическую норму (рис. 4).

Следовательно, в течение 1995–2013 годов на территории Карелии дожди были более интенсивны, чем в среднем за многолетний период, число дней с сильными дождями превышало норму по всему району исследований. Больше количество осадков стало выпадать за меньшее число суток.

Данные о числе дней с осадками различной интенсивности по отдельным пунктам наблюдения на территории Карелии приведены в таблице 2.

Поскольку сильные осадки характерны в основном для теплого периода года, следует отметить, что увеличение количества выпадающих атмосферных осадков отмечается также и в холодный период (см. рис. 3).

Выводы

Главным источником естественных ресурсов природных вод, а также одним из важнейших абиотических факторов, существенно влияющих на условия существования живых организмов, являются атмосферные осадки. Кроме того, атмосферные осадки определяют миграцию и распространение различных, в том числе и загрязняющих веществ в окружающей среде. Как и другие элементы климата, атмосферные осадки испытывают значительные изменения в пространстве и с течением времени. Изменчивость основных характеристик режима выпадения осадков определяется особенностями атмосферной циркуляции,

физико-географическими особенностями и сезоном года.

Анализ многолетних данных по режиму осадков на территории Карелии позволяет сделать следующие выводы. В целом в течение второй половины XX и в начале XXI веков наблюдается рост годовых сумм атмосферных осадков для всех районов республики. Средние многолетние значения за 1991–2013 гг. превышают климатические нормы на 20–70 мм. Анализ данных по месяцам показал, что в основном на территории Карелии отмечается рост сумм атмосферных осадков во все сезоны года. Увеличение общего количества осадков связано с увеличением интенсивности выпадения атмосферных осадков.

Литература

Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М. Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936–2000 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 10. С. 78–89.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., 2014. 60 с.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстре-

мальность климата // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 4. С. 50–67.

Кондратьев С. А., Назарова Л. Е., Бovyкин И. В. и др. Водный режим водосбора Онежского озера под воздействием изменений климата // *Известия РГО*. 2008. Т. 140, вып. 3. С. 21–26.

Климат Петрозаводска // Ред. Ц. А. Швер. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 212 с.

Климат Сортавалы // Ред. Ц. А. Швер и Л. С. Ракова. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 117 с.

Назарова Л. Е. Влияние колебаний климата на сток с водосбора Онежского озера // *География и природные ресурсы*. 2010. № 1. С. 171–174.

Романов А. А. О климате Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1961. 139 с.

Сало Ю. А., Назарова Л. Е. Возможные изменения климата и элементов водного баланса территории Карелии в 2001–2005 гг. // *Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы*. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2004. С. 88–101.

Семенов С. М. Осадки и водные объекты // *Гидрологические последствия изменений климата: Труды Британско-Российской конференции*. Барнаул: Пять плюс, 2009. С. 128–136.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // *Арктика. Экология и экономика*. 2012. № 2. С. 80–93.

Поступила в редакцию 28.01.2015

References

Bogdanova E. G., Gavrilova S. Yu., Il'in B. M. Vremennye izmeneniya atmosferykh osadkov na territorii Rossii po dannym ikh skorrektirovannykh znachenii za period 1936–2000 gg. [Time changes of atmospheric precipitation in Russia from the corrected data, 1936–2000]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2010. No 10. P. 78–89.

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. N., Bogdan M. I. Izmeneniya i izmenchivost' klimata evropeiskogo Severa Rossii i ikh vliyanie na vodnye ob'ekty [Climate changes and variability in the European North of Russia and their effect on water bodies]. *Arktika. Ekologiya i ekonomika*. 2012. No 2. P. 80–93.

Gruza G. V., Ran'kova E. Ya. Obnaruzhenie izmenenii klimata: sostoyanie, izmenchivost' i ekstremal'nost' klimata [Detection of changes in climate state, variability, and extremity]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2004. No 4. P. 50–67.

Kondrat'ev S. A., Nazarova L. E., Bovykin I. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Vodnyi rezhim vodosbora Onezhskogo ozera pod vozdeistviem izmenenii klimata [Water regime in the catchment of Lake Onego under climate changes]. *Izvestiya RGO*. 2008. Vol. 140. Iss. 3. P. 21–26.

Klimat Petrozavodsk [Climate of Petrozavodsk]. Eds. Ts. A. Shver. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 212 p.

Klimat Sortavaly [Climate of Sortavala]. Eds. Ts. A. Shver, L. S. Rakova. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 117 p.

Nazarova L. E. Vliyanie kolebanii klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera [Influence of climate fluctuations on the runoff from the catchment of Lake Onego]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2010. No 1. P. 171–174.

Romanov A. A. O klimate Karelii [On the climate of Karelia]. Petrozavodsk: Kareliya, 1961. 139 p.

Salo Yu. A., Nazarova L. E. Vozmozhnye izmeneniya klimata i elementov vodnogo balansa territorii Karelii v 2001–2005 gg. [Possible changes of climate and water balance elements for the territory of Karelia in 2001–2005]. *Klimat Karelii: Izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob'ekty i vodosbory* [Climate of Karelia. Variability and effect on water bodies and watersheds]. Petrozavodsk: KarRS of RAS. 2004. P. 88–101.

Semenov S. M. Osadki i vodnye ob'ekty [Precipitation and water bodies]. *Gidrologicheskie posledstviya izmenenii klimata: Trudy Britansko-Rossiiskoi konferentsii* [Hydrological impact of climate changes. Proceedings

of British-Russian conference]. Barnaul: Pyat' plyus, 2009. P. 128–136.

Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The second Roshydromet assessment

report on climate change and its consequences in the Russian Federation]. Obshchee rezyume. Moscow, 2014. 60 p.

Received January 28, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Назарова Лариса Евгеньевна

зам. директора по НИР, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nazarova@nwpi. krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576381

CONTRIBUTOR:

Nazarova, Larisa

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nazarova@nwpi. krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576381

ХРОНИКА

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ВОДНОЙ СТРАТЕГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПЕРИОД ДО 2020 ГОДА» (Петрозаводск, 6–11 июля 2015 г.)

С 6 по 11 июля 2015 г. в Петрозаводске на базе Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН прошла Всероссийская научная конференция «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Конференция была организована Научным советом Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши» совместно с Институтом водных проблем РАН и Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. В ее работе приняли участие более 100 ученых и специалистов, представлявших институты Федерального агентства научных организаций, Федерального агентства водных ресурсов, ведущие вузы страны, организации Минприроды РФ, Росгидромета и других ведомств, проектные и производственные организации (всего 29 организаций из 17 городов России). Заседания проходили в конференц-зале и библиотеке Карельского научного центра РАН. Работа конференции осуществлялась по пяти секциям. В рамках мероприятия было организовано специальное заседание «круглого стола» на тему «Совершенствование законодательной базы для восстановления и охраны ресурсов крупнейших озер России». Проведены научные экскурсии на известные водные объекты Карелии, такие как бальнеологический курорт «Марциальные воды» и водопад Кивач с посещением заповедника «Кивач» и музея на его территории.

На конференции заслушано более 80 пленарных, секционных и стендовых докладов. Материалы конференции были опубликованы

до ее начала в двухтомном сборнике научных трудов.

С приветствием к участникам обратились: руководитель Федерального агентства водных ресурсов М. В. Селиверстова, член Государственной думы РФ В. Н. Пивненко, заместитель председателя Оргкомитета чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов, заместитель председателя Оргкомитета д. ф.-м. н. А. Н. Гельфан, директор Института водных проблем Севера КарНЦ РАН д. г. н. Д. А. Субетто.

Рассматривались приоритетные научные проблемы, направленные на реализацию Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г., в их числе: совершенствование методов и моделей оценки и прогнозирования ресурсов и режима поверхностных и подземных вод в условиях нарастающего антропогенного воздействия и неопределенности



Труды конференции



Открытие конференции. Президиум

климатических и гидрологических характеристик; развитие методов прогнозирования процессов формирования и восстановления качества вод в природных объектах; определение допустимых воздействий на водные и экосистемы, в том числе крупнейших озер России – Байкала, Ладожского, Онежского и др. при различных сценариях антропогенной деятельности и изменений климата; совершенствование методов и технологий, направленных на повышение эффективности водоохранной деятельности, обеспечение экологически безопасного водопользования и улучшение экологического состояния водных объектов; разработка методологии и технологий управления риском катастрофических гидрологических явлений различного генезиса в условиях меняющегося климата и антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы; обоснование научных и технологических основ автоматизированных крупномасштабных систем комплексного

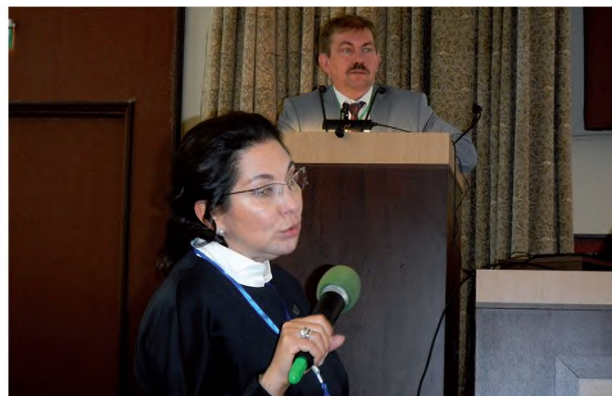
мониторинга водных объектов суши и их водосборов; совершенствование методологии интегрированного управления водными ресурсами применительно к гидрологическим, климатическим, экологическим, экономическим и социальным условиям России.

Участники конференции отметили, что обострение дефицита пресной воды может в долгосрочной перспективе оказать существенное влияние на развитие мировой экономики, т. е. водные ресурсы становятся основным лимитирующим фактором. Острота проблемы усугубляется отсутствием признанных международным сообществом механизмов трансграничного водопользования и охраны водных объектов.

В докладах подчеркивалось, что одним из основных направлений реализации Водной стратегии является улучшение состояния экосистем, восстановление надлежащего качества вод, ликвидация накопленного экологического



С приветственным словом выступили депутат Госдумы РФ В. Н. Пивненко и руководитель Федерального агентства водных ресурсов М. В. Селиверстова



ущерба, охрана водных объектов, снижение антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы, а также охрана от загрязнения подземных вод. Подчеркивалось, что, несмотря на известное сокращение производства в последние годы, наблюдался рост случаев аварийного, экстремально высокого и высокого загрязнения водных объектов. Выходом из создавшегося положения может стать разработка и реализация концепции приемлемого риска, основанная на принципе «предвидеть и предупреждать».

Отмечена важная роль пресных подземных вод для водоснабжения населения как в обычных условиях, так и в период чрезвычайных ситуаций при разрушении гидротехнических сооружений, водопроводов, технических средств водоснабжения, последствий террористических актов, катастрофического загрязнения существующих источников водоснабжения, природно-климатических катастроф. Особенно остро стоит вопрос о снижении уровня риска негативного воздействия вод – наводнений, подтопления территорий, засух и др. – на хозяйственную инфраструктуру, здоровье населения, состояние экосистем. Подчеркивалась необходимость продолжения работ по созданию современных методов информационного обеспечения принятия управленческих решений для снижения рисков возникновения опасных и чрезвычайных ситуаций.

Рассматривались проблемы сохранения и восстановления ресурсов крупнейших озер России. Отмечалась необходимость большего внимания к экспериментальным исследованиям процессов подо льдом крупнейших озер, которые по-прежнему остаются «белым пятном» современной лимнологии. На конференции были представлены новые результаты оценки связей аномалий климата Евразии и Северной Атлантики, которые использовались для

совершенствования прогноза изменений гидрологического режима, колебаний уровня озер Байкал, Ладожского, Онежского и Каспийского моря-озера. Представлены результаты расчетов на новых 3-D математических моделях для прогноза гидрологического режима и экосистем крупных озер при разных сценариях изменений климата и воздействия антропогенных факторов.

Помимо работы по секциям на конференции было организовано специальное заседание «круглого стола» на тему «Совершенствование законодательной базы для восстановления и охраны ресурсов крупнейших озер России». В заседании приняли участие 37 специалистов, представлявших ФАНО, университеты, учреждения Росгидромета, Министерство природопользования и экологии по РК, Государственную думу РФ, Законодательное собрание РК. Рассмотрены проблемы состояния крупных озер России – Ладожского и Онежского, вопросы разработки закона об охране ресурсов этих озер. С сообщениями об этом выступили академик В. А. Румянцев (ИНОЗ РАН), чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов (ИВПС КарНЦ РАН) и представитель Министерства по природопользованию и экологии по РК И. В. Кипрухин. Участники конференции и «круглого стола» отметили, что для сохранения водных и биологических ресурсов уникальных водных объектов – Ладожского и Онежского озер, до принятия закона об их охране, представляется важным разработать комплексную программу научного обоснования СКИОВО с учетом правил использования водных ресурсов озер в современных условиях. С сообщением об опыте, проблемах реализации Закона об охране ресурсов озера Байкал выступил д. г. н. М. В. Болгов (ИВП РАН). Отмечалась сложная водохозяйственная обстановка в бассейне озера Байкал и водохранилищ Ангарского каскада ГЭС, обусловленная



В зале заседаний



маловодьем, а также недостаточным научным обоснованием Закона об охране озера, в результате чего Правительству РФ пришлось принимать специальное постановление для регулирования сложной водохозяйственной ситуации.

Большое внимание участники конференции уделили региональным проблемам водного хозяйства страны. Подчеркивалось, что они в значительной степени связаны с образованием локальных дефицитов водных ресурсов в результате истощения и чрезмерной эксплуатации ресурсов поверхностных и подземных вод, существенных нарушений гидрологического режима в условиях регулирования стока, а также комплекса антропогенных воздействий как непосредственно на сток, так и на состояние водосбора. В докладах и выступлениях подчеркивалось, что региональные водные проблемы требуют для своего решения выполнения комплексных научных проектов, затрагивающих широкий круг вопросов, начиная с разработки новых подходов к управлению каскадами водохранилищ в условиях большой неопределенности результатов гидрологического прогноза и вплоть до выяснения особенностей функционирования водных экосистем в условиях измененного гидрологического режима.

Ряд выступлений были посвящены проблемам Нижней Волги, где в результате нерационального использования водных ресурсов происходит деградация гидрографической сети, а экосистемы Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги испытывают значительное негативное воздействие.

На конференции отмечалось, что в числе основных недостатков сложившейся системы управления водными ресурсами в России наблюдается чрезмерная централизация принимаемых решений. Проблемы водного хозяйства обусловлены незавершенностью законодательной и нормативно-методической базы,

несовершенством системы управления водными ресурсами, мониторинга, их адаптации к современному уровню и перспективам экономического развития страны.

Участники конференции подчеркнули, что за период осуществления Водной стратегии выполнены серьезные научные исследования, результаты которых могут послужить основой для успешного решения федеральных и региональных проблем в рамках ключевых направлений реализации Водной стратегии РФ. В частности, разработаны методы: информационного обеспечения принятия решений по управлению риском наводнений; долгосрочных ансамблевых прогнозов стока в период весеннего половодья и летней межени; оценки гидрологических последствий изменения климата для ряда крупных речных бассейнов России, основанные на современных гидрологических и климатических моделях; оценки и прогноза изменения гидрологического режима и экосистем Ладожского, Онежского озер, а также водного режима Каспийского моря-озера под влиянием антропогенных факторов и климата; комбинированного подхода к внедрению наилучших доступных технологий (НДТ) в практику регулирования воздействий на окружающую среду; обоснования новой системы оценки количества загрязненных вод; выполнена оценка современных ресурсов поверхностных и подземных вод по регионам и субъектам РФ; разработаны научные и технологические основы проектирования автоматизированных систем мониторинга качества поверхностных вод суши. По результатам обобщений изданы: атлас возобновляемых водных ресурсов европейской части России, атласы и справочники ряда крупных озер и озерных регионов.

Участники конференции сформулировали ряд предложений и рекомендаций. В том числе отмечено, что для повышения эффективности



Научные экскурсии для участников конференции



научного обеспечения реализации основных задач Водной стратегии РФ для обеспечения гарантированного водоснабжения необходимо обратиться в Минприроды России с предложением о создании под методическим руководством РАН межведомственной программы, направленной на модернизацию существующих оценок современных и будущих изменений возобновляемых водных ресурсов РФ. Для решения задач сохранения и восстановления водных объектов требуется: разработать единую нормативно-методическую и метрологическую базу управления качеством вод; концепцию приемлемого риска, в основе которой лежит принцип «предвидеть и предупреждать»; усовершенствовать ряд положений федерального законодательства, касающегося закона «Об охране окружающей среды» и отдельных законодательных актов Российской Федерации и Водного кодекса РФ; создать юридически легитимный механизм региональных ПДК; нормативно-методическую базу регулирования сбросов загрязняющих веществ с учетом допустимых воздействий на водные объекты и принципа наилучших доступных технологий.

Необходимо совершенствование организационно-экономической структуры системы управления качеством вод. В частности, отмечалась необходимость направления платежей за загрязнение вод исключительно на водоохранные и восстановительные мероприятия (реализация принципа «вода охраняет воду»); перераспределение средств, поступающих в федеральный, региональные и местные бюджеты. Предлагается усовершенствовать существующую систему мониторинга; обеспечить бесплатный доступ к архивным и оперативным данным Росгидромета для бюджетных научных организаций и профильных вузов страны; создать специализированные базы данных гидрологических катастроф и их последствий; усовершенствовать систему предупреждения об опасных гидрометеорологических явлениях и высоких уровнях загрязнения окружающей среды, включая водные ресурсы; требуется модернизировать существующую систему статистического учета предприятий и организаций, осуществляющих забор и использование воды; необходимо разграничить полномочия между различными уровнями системы государственного управления с исключением практики дублирования функций, осуществляемых органами исполнительной власти. В докладах и выступлениях подчеркивалась необходимость создания атласа качества водных ресурсов Российской Федерации для совершенствования системы принятия управленческих решений.

Следует обратиться в Минприроды России и Росгидромет с предложением о поддержке и финансовом обеспечении исследовательских работ в этой области. Участники конференции обращают внимание Минприроды России, Минобрнауки России, Федерального агентства водных ресурсов и других руководящих органов на то, что решение научных задач требует укрепления научного потенциала исследовательских организаций, представляется крайне важным усилить подготовку в высших учебных заведениях России специалистов – гидрологов, гидрохимиков, гидробиологов, гидроэкологов и др., с учетом современных вызовов.

Участники конференции отмечают ее высокий научный уровень и выражают благодарность сотрудникам Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, Института водных проблем РАН, службам Президиума Карельского научного центра РАН за хорошую организацию и проведение конференции; Федеральному агентству водных ресурсов, Невско-Ладожскому бассейновому водному управлению, Российскому фонду фундаментальных исследований за содействие и финансовую поддержку, а также Российской академии наук и Федеральному агентству научных организаций за содействие.

Доклады о современном состоянии и прогнозе изменений экосистем крупных озер России выполнены при поддержке Российского научного фонда (гранты № 14-17-00740 и 14-17-00766). Материалы конференции представлены на сайтах ИВПС КарНЦ РАН (<http://water.krc.karelia.ru>) и ИВП РАН (<http://www.iwp.ru>).

*Заместитель председателя
Оргкомитета конференции,
чл. - корр. РАН Н. Н. Филатов*

Земля — водная планета, на которой качество воды
определяет качество жизни.
Хорошая вода — хорошая жизнь.
Плохая вода — плохая жизнь.
Нет воды — нет жизни.

Сэр Питер Блэйк



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук», с 2015 г.)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, потери науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил её оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Журнал имеет полноценную электронную версию на базе Open Journal System (OJS), позволяющую перевести предоставление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронный формат и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Редакционный совет журнала «Труды Карельского научного центра РАН» (Труды КарНЦ РАН) определил для себя в качестве одного из приоритетов полную открытость издания. Это означает, что пользователям на условиях свободного доступа разрешается: читать, скачивать, копировать, распространять, печатать, искать или находить полные тексты статей журнала по ссылке без предварительного разрешения от издателя и автора. Учредители журнала берут на себя все расходы по редакционно-издательской подготовке статей и их опубликованию.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные варианты статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502). К рукописи желательно прилагать два бумажных экземпляра, напечатанных на одной стороне листа формата А4 в одну колонку.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: *УДК* курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); таблицы (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (страна, город) на русском и английском языке; должности, научные звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты для каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ** должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на вкладышах (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо начальным словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. На полях бумажного экземпляра рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIF (* .TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки из текста статьи должны быть убраны и представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указа-

* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

** Обращаем внимание авторов, что в связи с подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографических описаний и научного цитирования расширенная аннотация на английском языке, а также транслитерированный в латиницу список использованной литературы приобретают особое значение.

нием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменяются. Крупномасштабные карты желательны приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L. 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicis* (Gmelin 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления (http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (References). Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Описания русскоязычных работ указываются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать его библиографическое описание вместо транслитерированного. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатной программы транслитерации на сайте <http://translit.ru/>, вариант BCI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных CrossRef. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32:635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS

Аннотация на английском языке

Key words: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Частота встречаемости видов нематод в исследованных биотопах

Биотоп (площадка)	Кол-во видов	Встречаемость видов нематод в 5 повторностях				
		100 %	80 %	60 %	40 %	20 %
1Н	26	8	4	1	5	8
2Н	13	2	1	1	0	9
3Н	34	13	6	3	6	6
4Н	28	10	5	2	2	9
5Н	37	4	10	4	7	12

Примечание. Здесь и в табл. 3–4: биотоп 1Н – территория, заливаемая в сильные приливы; 2Н – постоянно заливаемый луг; 3Н – редко заливаемый луг; 4Н – незаливаемая территория; 5Н – периодически заливаемый луг.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

B References:

Volf G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, No 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142.

B References:

Viktorov G. A. Mezovidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. 1970. Vol. 31, No 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, No 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142.

Ссылки на материалы конференций

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

B References:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.)* [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. С. 21–46.

B References:

Sheftel' B. I. *Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri* [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: dis. ... kand. biol. nauk [PhD Diss. (Biol.)]. Moscow, 1985. P. 21–46.

Ссылки на патенты

Патент РФ № 2000130511/28.04.12.2000.

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат // Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

B References:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. *Optiko-elektronnyi apparat* [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No 2122745]. 1998. Bulletin No 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

B References:

Grebenshchikov Ya. P. *K nebol'shomu kursu po bibliografii: materialy i zametki, 26 fevr. – 10 marta 1924 g.* [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

B References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. *Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov* [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. *Elektron. b-ki [Digital library]*. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Demografija. *Oficial'naja statistika* [Demography. Official statistics]. *Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki* [Federal state statistics service]. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

B References:

Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003 [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS

- G. G. Gavrilenko, G. E. Zdrovennova, R. E. Zdrovennov, N. I. Palshin, A. V. Mitrokhov, A. Yu. Terzhevnik. HEAT FLUX AT THE WATER-SEDIMENT INTERFACE IN A SHALLOW LAKE 3

HYDROBIOLOGY AND ICHTHYOLOGY

- 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 10

- T. P. Kulikova, A. V. Ryabinkin. CURRENT STATUS OF THE FAUNA IN LAKES OF DIFFERENT TYPES IN KARELIA (BASED ON 2008–2011 SURVEYS) 25

- E. V. Tekanova, E. V. Makarova, N. M. Kalinkina. AN ASSESMENT OF THE CONDITION OF THE WATER OF LAKE ONEGO INFLOWING STREAMS UNDER HUMAN IMPACT INFLUENCE USING MICROBIOLOGICAL AND TOXICOLOGICAL PARAMETERS 44

HYDROCHEMISTRY OF WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS

- N. A. Belkina, D. A. Subetto, N. A. Efremenko, M. S. Potakhin, N. V. Kulik. THE CHEMICAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS IN NORTHERN LAKE LADOGA AS AN INDICATOR OF LONG-TERM VARIATIONS IN THE LAKE ECOSYSTEM 53

- V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin, D. B. Denisov. TENDENCIES IN THE CONTENT CHANGE OF HEAVY METALS IN LAKE SEDIMENTS IN NORTHERN FENNOSCANDIA OVER THE LAST CENTURIES 62

- G. T. Frumin, Yu. V. Krashanovskaya. PREDICTING THE TROPHIC STATUS OF SOME LAKES OF KAZAKHSTAN 76

PALEOLIMNOLOGY

- T. A. Blyakharchuk, E. Yu. Mitrofanova, A. N. Eirikh. INTEGRATED PALAEOECOLOGICAL INVESTIGATION OF BOTTOM SEDIMENTS FROM LAKE MANZHEROKSKOYE IN THE PIEDMONT ALTAI REGION 81

RESEARCH METHODS

- G. E. Zdrovennova, R. E. Zdrovennov, N. I. Palshin, A. V. Mitrokhov, G. G. Gavrilenko, A. Yu. Terzhevnik. DATABASE "RADIATION REGIME OF LAKE VENDYURSKOE: RESULTS OF LONG-TERM OBSERVATIONS" AND ITS POTENTIAL APPLICATIONS 100

- V. V. Menshutkin. FRACTAL ANALYSIS OF CONFIGURATION OF LAKES IN KARELIA 109

- L. E. Nazarova. PRECIPITATION OVER THE TERRITORY OF KARELIA 114

CHRONICLE

- N. N. Filatov. The pan-Russian conference "Scientific support to the implementation of the "Russian Water Strategy Until 2020" (Petrozavodsk, July 6–11, 2015) 121

- INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 126

Научное издание

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 9, 2015

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

*Печатается по решению
Президиума Карельского научного центра РАН*

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-48848 от 02.03.2012 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Редактор А. И. Мокеева
Оригинал-макет Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 28.09.2015. Формат 60x84¹/₈.
Гарнитура Pragmatica. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 14,50. Усл. печ. л. 15,35.
Тираж 500 экз. Заказ 313.

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50