

*Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова, А.П. Георгиев, Т.В. Ефремова,  
Н.И. Пальшин*

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР СЕВЕРА  
ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

*N.N. Filatov, L.A. Rukhovets, L.E. Nazarova, A.P. Georgiev, T.V. Ephraim,  
N.I. Pal'shin*

**CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE ECOSYSTEM OF LAKE NORTH OF  
EUROPEAN RUSSIA**

*Изучены особенности воздействия изменений климата на экосистемы озер  
Севера Европейской территории России (Восточной Фенноскандии).*

*Ключевые слова: Озера, климат, биота, экосистемы, измерения, моделирование.*

*The features of the climate change impact to the ecosystems of lakes located in a  
fairly strong anthropogenic influence on the example of the lakes of the North European  
part of Russia.*

*Key words: Lakes, climate, biota, ecosystems, measuring, modeling.*

***Материалы и методы исследований***

Использованы данные наблюдений на метеорологических станциях (МС) Росгидромета за последние 100 лет, а также сведения о гидрологическом и химико-биологическом режимах более, чем по 60 озерам Севера ЕТР, при этом для анализа использовались данные, имеющие наибольшую длительность наблюдений, порядка 60 лет, [8] (рис. 1). Выполнен вероятностный анализ данных рядов гидрометеорологических наблюдений, элементов водного баланса, гидрологических и химико-биологических параметров озер для изучения их изменчивости во временных масштабах от десятков лет до внутригодовых колебаний.

Для оценки реакции Ладожского и Онежского озер кроме данных измерений использовались разработанные коллективом авторов СПб ЭМИ РАН [1, 15, 27] 3-х мерные математические модели, в основе которых лежат методы геофизической гидродинамики, численные методы решения уравнений в частных производных, методы анализа водных экологических систем.

Исследованию влияния климата на гидрологический режим и биоту озер Карело-Кольского региона большое внимание уделялось многими исследователями. Отметим ряд работ А.М. Догановского [6, 7], А.М. Догановского и Н.В. Мякишевой [5].

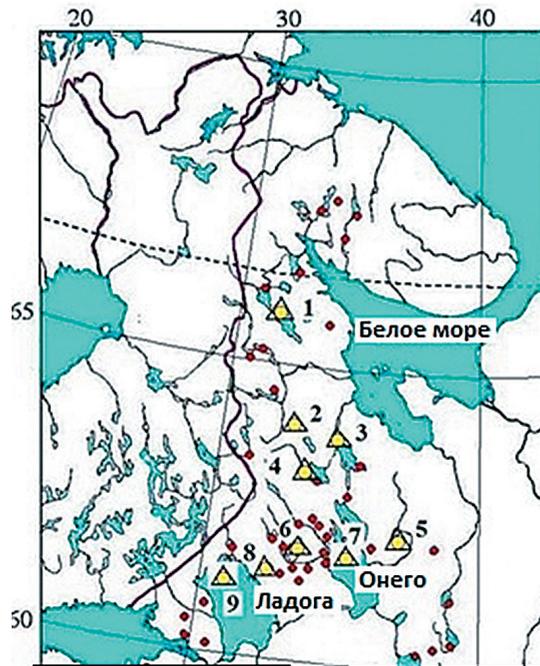


Рис. 1. Схема расположения исследованных озер: Озера показаны точками. Треугольником с кружком показаны озера, для которых имеются наиболее длительные наблюдения вплоть до 2011 г.

1 — Топозеро; 2 — Ругозеро; 3 — Выгозеро; 4 — Сегозеро; 5 — Водлозеро; 6 — Сямозеро;  
7 — Онежское; 8 — Тулмозеро; 9 — Ладожское

### *Изменения климата Севера Европейской территории России по данным инструментальных измерений*

По данным анализа гидрометеорологических наблюдений на Севере ЕТР в течение XX и первого десятилетия XXI в. отмечается положительная тенденция изменения средней годовой температуры воздуха. Начиная с 1988 г. значения средней годовой температуры воздуха превышали климатическую норму, рассчитанную за 1961–1990 гг., практически во все годы [12, 19]. Интенсивность повышения температуры воздуха на Севере ЕТР постепенно возрастает по мере продвижения от высоких широт к более низким. Коэффициенты линейных трендов за период 1951–2011 гг. составляют 0,20–0,34°С/10 лет для территории Карелии, около 0,30°С/10 лет на территории Кольского полуострова. Выявлены квазициклические колебания метеопараметров с различными временными масштабами (около 60, 30, 11, 5 и 2 лет).

Результаты анализа данных показывают, что во внутригодовом ходе изменение средних месячных значений температуры воздуха происходит неравномерно для разных сезонов года и неоднородно для исследуемого региона. Общим является то, что наиболее интенсивное потепление отмечается в марте (+0,45 ... +0,6°С/10 лет) на всех

станциях исследуемой территории. В течение 1951–2011 гг. наблюдается рост годовых сумм осадков. Заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов.

### *Влияние изменения климата на гидрологический режим озер*

**Уровень воды.** Особый интерес вызывают процессы в экосистемах крупнейших озер Европы, и в частности колебания уровня воды, элементов водного баланса, которые отражают происходящие климатические изменения. В колебаниях уровня воды Ладожского и Онежского озер по данным с 1881 по 2011 г. нет заметного тренда, отмечаются квазипериодические колебания, маловодные и многоводные годы (рис. 2).

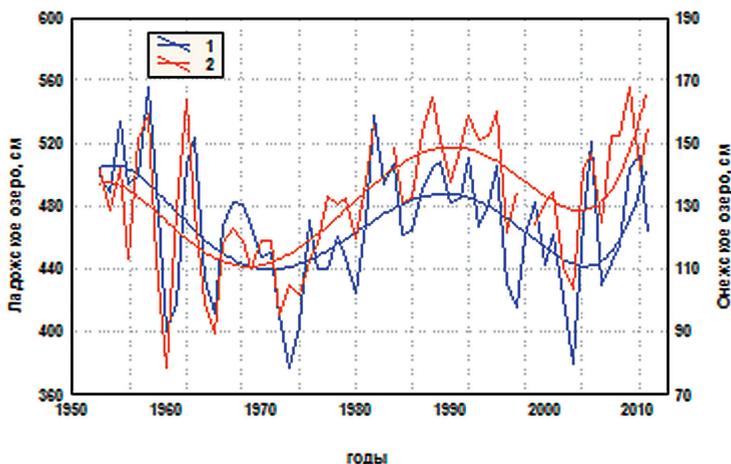


Рис. 2. Основные тенденции изменений уровня (в см) крупнейших озер Европы: Ладожского (1) и Онежского (2) (1953–2011 гг.). Полиномиальное сглаживание

По спектрам колебаний уровня озер можно выделить составляющие с временными масштабами порядка 60, 30 и 6–7 лет.

**Температура воды.** По данным измерений в последнее десятилетие XX — первое десятилетие XXI в. отмечается повышение средней годовой температуры поверхности воды (ТПВ) Великих озер Европы. За 60-летний период коэффициенты линейных трендов средней ТПВ за теплый период года (июнь–октябрь) в других озерах Севера ЕТР изменялись от 0,21 до 0,29°C/10 лет, возрастая в крупных и глубоких озерах и по мере продвижения с севера на юг региона. Межгодовая изменчивость средних декадных значений ТПВ у берега во всех озерах в период летнего прогрева была больше 10°C, а сроков перехода температуры воды через фиксированные значения (4 и 10°C) больше 30 суток. Наименьшие изменения в термическом режиме озер в течение 60-летнего периода происходили в северных озерах. Даты перехода ТПВ через 10°C, которое определяют как «биологическое лето», на всех исследуемых озерах в течение 60-летнего периода весной сдвигались к более ранним срокам на 1,4–1,7 сут/10 лет, а осенью к более поздним срокам на 1,0–2,3 сут/10 лет.

Заметные тренды ТПВ за разные периоды XX столетия наблюдались не только в озерах Севера ЕТР, но и центральной России [Груза и др., 2008], Европы [28], Северной Америки [24]. В озере Байкал за период 1896–2005 гг. по данным гидрологического поста Листвянка также происходил рост средней ТПВ в мае–сентябре с трендом  $0,085^{\circ}\text{C}/10$  лет [20].

**Ледовый режим.** В работе [25] для Ладожского озера показано, что по данным за 1956–2003 гг. ледовый покров в последние годы устанавливается на 1–6 дней позднее, а время вскрытия озера ото льда наступает раньше на 14 дней. Для Онежского озера отмечается такая же тенденция [16]. Продолжительность безледоставного периода на Онежском озере возросла в среднем от 215 дней за год в конце XIX в. до 227 дней в среднем за год в настоящее время.

За последние 10 лет продолжительность периода ледостава на озерах разных размеров Севера ЕТР сократилась в среднем на 11–16 суток, по сравнению со средними значениями за весь 60-летний период. Линейные тренды ледовой фенологии для 8 озер Севера ЕТР за период с 1950 по 2011 г. показывают за 60-летний период заметную тенденцию к более поздним срокам установления льда на 2–12 суток и ранним срокам окончания ледостава на 2–8 суток [8].

Для крупных озер Севера России — Ладожского, Онежского, Таймыр, для озера Байкал, также отмечена тенденция к более ранним срокам разрушения ледового покрова и уменьшению продолжительности ледостава [2].

Для большинства озер Северной Америки, Европы и Азии показано, что ледостав на озерах стал начинаться позднее, в среднем  $6,3$  дней/100 лет; разрушение раньше, в среднем  $5,8$  дней/100 лет; продолжительность существования ледяного покрова снизилась в среднем на 12 дней/100 лет [24, 26, 28, 29].

**Сценарии изменения климата в регионе для оценки термогидродинамики озер.** Для задания потока тепла и суммарного притока воды в озеро в условиях возможного изменения климата на водосборе Онежского озера использовались результаты прогнозных расчетов до 2050 г. с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (модель ЕСНАМ-4) при различных сценариях изменения концентрации  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов в атмосфере [3, 11, 19, 27].

**Изменения полей течений и температуры воды.** При моделировании течений, циркуляция вод озер (система течений), соответствующих средним многолетним за период порядка внешнего водообмена была названа *климатической циркуляцией* [15]. Циркуляция вод озера, при построении которой тепловой поток задавался на основе максимальных значений, названа *теплой*. Для теплового потока, определенного по минимальным значениям удельного — *холодной* и условно соответствовала значениям при похолодании климата. При потеплении климата заметны существенные изменения полей ТПВ. На поверхности Онежского озера в июне месяце нет 4 градусной изотермы, характеризующей термобар. При потеплении до  $2^{\circ}\text{C}$  гомотермия в озерах в весенний период исчезает на 10 дней раньше, термобар формируется на 20 дней раньше; смещаются сроки образования ледового покрова. Онежское озеро полностью покрывается льдом в первой половине февраля, тогда как для климатической (среднепогодной) циркуляции это явление наблюдается в конце декабря — начале января; при потеплении климата уменьшается площадь ледяного покрова, в результате чего скорости течений

в зимний период в озерах возрастают за счет дополнительного воздействия поля ветра. Такой тип циркуляции вод в зимний период является типичным для американских Великих озер, расположенных в более теплом климате, чем Ладожское и Онежское озера.

**Реакция рыбной части сообщества озер на изменение климата**

Изменения температуры воды на рыбную часть сообщества может проявляться как прямо (влияние на инкубацию икры, выживаемость личинок, определяет границы ареалов распространения различных видов и пр.), так и опосредованно, через изменение условий для роста и развития различных видов, в том числе конкурентных преимуществ отдельных видов в условиях их обитания. Исследовалось влияние изменения климатических условий на численность и видовой состав ихтиофауны на основе данных по уловам рыб в разнотипных озерах Севера ЕТР. Для анализа выбраны наиболее эксплуатируемые по объему добычи рыбы в регионе водоемы, по которым имеются репрезентативные ряды наблюдений: Ладожское, Онежское, Выгозеро, Сязозеро и Водлозеро (рис. 1), существенно различающиеся по термогидродинамическому режиму, трофическому статусу и продуктивности. Выделены агрегированные группы *осенненерестовых* видов рыб (сиг, лосось, паляя, форель) и *весенненерестовых* (семейство карповых и окуневых). Для сравнения были использованы не абсолютные значения уловов, а изменение их структуры по удельному весу видов рыб (процент от общего объема вылова в данном озере), отражающих ихтиофауну озер.

По температурному предпочтению ихтиофауну озер региона можно разделить на три группы рыб: *холодноводные* (сиги, ряпушка, корюшка, хариус, налим), относительно *тепловодные* весенненерестовые (синец, густера, лещ, судак), и *фоновые* или *эвритермные* (щука, плотва, язь, окунь, ерш и др.), которые мало восприимчивы к температурным изменениям окружающей среды. Были изучены продолжительность «биологического лета», изменения удельного веса в уловах холодноводных и тепловодных видов рыб в исследуемых озерах (рис. 3).

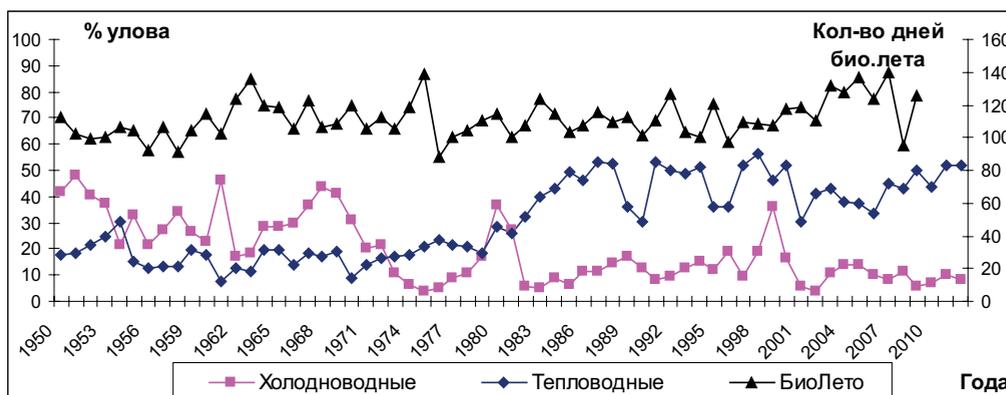


Рис. 3. Динамика продолжительности «биологического лета» и удельного веса (% общего улова) тепловодных и холодноводных видов в оз. Водлозеро (1950–2012 гг.)

Продолжительность «биологического лета» за 60 лет увеличилась в озерах в северной части региона на 10–14 суток (рис. 3), а в крупных и средних мета- и гипотермических озерах центральной и южной части региона на 17–24 суток. С увеличением числа дней «биологического лета» при потеплении климата на Севере ЕТР роль тепловодных рыб в уловах возрастает, а холодноводных — уменьшается (рис. 3). Для крупного и глубоководного водоема процессы трансформации ихтиофауны под влиянием климатических факторов проходят медленнее, чем в мелководных водоемах. Велика роль в изменениях ихтиофауны и происходящих экономических преобразованиях. За последние 50 лет заметно увеличение доли вылова теплолюбивых видов в относительно крупных озерах и на востоке региона, в Архангельской области: Кенозеро, Лекшмозеро [4].

На основании исследований отметим, что для более крупных озер процессы трансформации ихтиофауны происходят медленнее.

В работе Шуттера и др. [30] для озер Европы и Северной Америки было показано, что уменьшение продолжительности существования ледяного покрова и изменения термического режима непосредственно влияет на рыбопродуктивность и смертность рыб. Потепление климата приводит к сокращению числа холоднолюбивых видов. Быстрые климатические изменения последних 30 лет сокращают срок адаптации этих видов к новым условиям, а теплолюбивые виды получают преимущество для развития.

Современные изменения климата и возможное его потепление на Севере ЕТР на 1–3°C до 2050 г. может негативно отразиться на рыбном сообществе озер Севера ЕТР, когда холоднолюбивые виды, такие как лосось, сиг и др., замещаются более теплолюбивыми, такими как окунь, плотва и др., что наблюдается также и при эвтрофировании и закислении озер при антропогенном воздействии.

#### ***Реакции озерных экосистем на изменения климата и антропогенной нагрузки по результатам моделирования***

Комплекс математических моделей экосистем для Ладожского и Онежского озера [1, 15], основанных на результатах многолетних исследований, был использован для воспроизведения основных особенностей круглогодичного функционирования экосистем этих озер. Расчеты показали, что модель экосистемы Онежского озера адекватно воспроизводит круглогодичное функционирование экосистемы, по крайней мере, с точки зрения годовой динамики обобщенной сырой массы фитопланктона. Темпы развития фитопланктона в Онежском озере, если рассматривать биомассу, существенно уступают таковым в Ладожском. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что климатические воздействия лишь незначительно влияют на функционирование экосистемы озер: изменения в развитии фитопланктона значимы только в осенний период, а зоопланктона — более заметны. Можно сделать вывод, что климатические воздействия лишь несколько усиливают или ослабляют роль современных изменений биогенной нагрузки. В то же время отметим, что по данным моделирования при дальнейшем потеплении климата в Великих озерах Европы возможно снижение биомассы фитопланктона, особенно в осенний период, так как водоросль *Aulacosira islandica*, которая дает главный вклад в биомассу фитопланктона и развивается только при температуре воды, не превышающей 6°C.

Работа выполнена при поддержке гранта № 14-17-00740.

### **Литература**

1. *Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А.* Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Под ред. Л.А. Руховца. — СПб.: Наука, 2003. — 364 с.
2. *Водные ресурсы России и их использование.* Ред. И.А. Шикломанов. — СПб., 2008. — 598 с.
3. *Голицын Г.С., Ефимова Л.К., Мохов И.И. и др.* Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI вв. // Изв. РГО, 2002, т. 134, вып. 6, с. 36–47.
4. *Дворянкин Г.А.* Экологическая характеристика рыбной части сообщества Кенозерского национального парка и биология основных промысловых видов рыб. // Сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. — Архангельск, 2011, с. 131–147.
5. *Догановский А.М., Мякишева Н.В.* Уровень Ладожского озера в различных диапазонах частот. Под ред. Н.Н. Филатова. — Петрозаводск, 2000, с. 352–358.
6. *Догановский А.М.* Многолетние колебания уровня Ладожского озера. // Современные проблемы в гидрометеорологии. — СПб., 2006, с. 175–183.
7. *Догановский А.М.* Уровненный режим озер — интегральный показатель климатических и экологических изменений. // Общество. Среда. Развитие (Тerra Humana), 2007, № 1.
8. *Ефремова Т.В., Пальшин Н.И.* Сроки ледовых явлений на водоемах Северо-Запада России. // Метеорология и гидрология, 2011, № 8, с. 89–98.
9. *Кудерский Л.А.* Состав и промысловое значение рыбного населения Ладожского озера. // Рыбохозяйственное исследование больших озер Северо-Запада европейской части России: Сборник научных трудов, вып. 334. — СПб., 2009, с. 138–214.
10. *Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее.* Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Дракковой. — СПб.: Наука, 2002. — 327 с.
11. *Меляшко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Малевский-Малевиц С.П., Надежина Е.Д., Спорышев П.В.* Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии. // Метеорология и гидрология, 2004, № 7, с. 5–26.
12. *Назарова Л.Е.* Особенности динамики температурного режима Карелии. // География и природные ресурсы, № 4, 2012.
13. *Онежское озеро.* Атлас. Отв. ред. Н.Н. Филатов. — Петрозаводск: Кар.НЦ РАН, 2010. — 151 с.
14. *Петрова Л.П., Кудерский Л.А.* Водозеро: природа, рыбы, рыбный промысел. — Петрозаводск, 2006. — 196 с.
15. *Руховец Л.А., Петрова Н.А., Менишуткин В.В., Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Полосков В.Н., Петрова Т.Н., Сусарева О.М.* Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки. // Водные ресурсы, 2011, т. 38, № 6, с. 740–752.
16. *Сало Ю.А., Назарова Л.Е.* Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера под влиянием изменений климата. // Известия Русского географического общества, 2011, т. 143, № 3, с. 50–54.
17. *Тихомиров А.И.* Термика крупных озер. — Л.: Наука, 1982. — 232 с.
18. *Филатов Н.Н.* Гидродинамика озер. — СПб.: Наука, 1991. — 200 с.
19. *Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И., Руховец Л.А., Толстиков А.В., Шаров А.Н.* Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата. // Доклады Академии наук, 444, № 5, 2012, с. 554–557.
20. *Шимараев М.Н.* О влиянии Северо-Атлантического колебания (NAO) на ледово-термические процессы на Байкале. // Доклады Академии наук, 2008, 423, № 3, с. 397–400.
21. *Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Donk E.V., Weyhenmeyer G.A., Winder M.* Lakes as sentinels of climate change. // Limnol. Oceanogr., 2009, 54 (6, part 2), p. 283–297.
22. *Assel R.A., Robertson D.M.* Changes in winter air temperatures near Lake-Michigan, 1851–1993, as determined from regional lake-ice records. // Limnol. Oceanogr., 1995, 40, p. 165–176.
23. *Dibike Y., Prowse T., Saloranta T., Ahmed R.* Response of Northern Hemisphere lake-ice cover and lake-water thermal structure patterns to a changing climate. // Article first published online: 11 APR 2011. DOI: 10.1002/

- hyp.8068. Hydrological Processes. Special Issue: Canadian Geophysical Union — Hydrology Section, vol. 25, Issue 19, p. 2942–2953, 15 September 2011.
24. *Jensen O.P., Benson B.J., Magnuson J.J., Card V.M., Futter M.N., Soranno P.A., Stewart K.M.* Spatial analysis of ice phenology trends across the Laurentian Great Lakes region during a recent warming period. // *Limnol. Oceanogr.*, 2007, 52, p. 2013–2026.
  25. *Karetnikov S., Naumenko M.* Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years. // *Hydrol. Process.* Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8048. 2011.
  26. *Korhonen J.* Long-term changes in lake ice cover in Finland. // *Nordic Hydrology*, 2006, 37, p. 347–363.
  27. *Ladoga and Onego — Great European Lakes: Modeling and Experiment.* Rukhovets L., Filatov N., (Eds.). — London, Springer-Praxis, 2010. — 302 p.
  28. *Livingstone D.M., Adrian R., Blenchnier T., George G., Weyhwenmeyer G.A.* Lake ice phenology. The impact of Climate Change on European Lakes. — Springer, 2009. — 507 p.
  29. *Magnuson J.J.* History and heroes: the thermal niche of fishes and long-term lake ice dynamics. // *J Fish. Biol.*, 2010, 77, p. 1731–1744.
  30. *Shuter B., Helland I. P., Zweimü I., Hölker F.* The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. // *Aquatic Sciences*. 08/2012; DOI:10.1007/s00027-012-0274-3.