

УДК 556.5

**РАЗНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ВОДЫ
В ОЗЕРАХ РОССИИ. АРКТИЧЕСКИЙ РЕГИОН. УМБОЗЕРО****Мякишева Н.В., Давыденко Е.В., Орлов Д.А.***Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
e-mail: davydenko91@mail.ru*

В работе использовались данные за период инструментальных наблюдений с 1946 по 2017 г. (70 лет). Выполнен вероятностный анализ внутригодовой и многолетней изменчивости уровней воды озера Умбозеро. Для анализа ритмики годовой цикличности уровня воды в озере использовался метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). Для объяснения выявленных особенностей многолетних колебаний уровня озера привлекались данные наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях Мурманск, Ковдор, Каневка и Янискоски. Для анализа структуры временных рядов выполнялась их фильтрация с помощью методов низкочастотной и высокочастотной фильтрации Баттерворта с частотой среза $\omega = 0,57$ рад./год. Временной ряд индекса де Мартона (α^M), рассчитанный по данным наблюдений на ближайшей к озеру метеостанции, позволил проанализировать увлажненность бассейна Умбозера. В работе показано, что в рассматриваемом регионе наблюдается общее потепление климата, на фоне которого четко выражен период относительного похолодания с 1940 по 1970 г. Увеличение осадков отмечается только для метеостанций Мурманск и Янискоски. Выявленное соотношение тепла и влаги приводит к незначительному росту общей увлажненности территории. Для многолетней изменчивости уровня воды в Умбозере характерно наличие статистически значимого линейного тренда на повышение, на фоне которого проявляются периоды локальной нестационарности, когда в течение нескольких лет наблюдается устойчивое увеличение или уменьшение уровня воды в озере. Для внутригодового хода уровня воды в озере Умбозеро характерен максимум в июле, минимум – в апреле. Средняя многолетняя амплитуда колебания составляет 58 см при средней многолетней амплитуде дисперсии – 137 см². Полученные результаты позволяют в дальнейшем рассматривать Умбозеро, функционирующее преимущественно в естественном режиме, в качестве озера-аналога при исследовании больших неизученных озёр Мурманской области.

Ключевые слова: озеро Умбозеро, уровни воды, разномасштабная изменчивость, вероятностный анализ

**RUSSIAN LAKES WATER LEVEL MULTISCALE VARIABILITY.
THE ARCTIC REGION. LAKE UMBOZERO****Myakisheva N.V., Davydenko E.V., Orlov D.A.***Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg,
e-mail: davydenko91@mail.ru*

The work used data for the period of instrumental observations from 1946 to 2017 (70 years). Probabilistic analysis of intra-annual and long-term variability of water levels of Lake Umbozero was performed. To analyze the rhythmicity of the annual cyclicity of the water level in the lake, the method of the theory of periodically correlated random processes (PCRCP) was used. To explain the revealed features of long-term fluctuations in the lake level, data from observations of air temperature and precipitation at the Murmansk, Kovdor, Kanevka and Yaniskoski weather stations were used. To analyze the structure of time series, they were filtered using low-frequency and high-frequency Butterworth filtering methods. The time series of the De Marton index (α^M) made it possible to analyze the moisture content of the Umbozer basin. The paper shows that in the region under consideration there is a general warming of the climate, against which the period of relative cooling from 1940 to 1970 is clearly expressed. The presence of a statistically significant linear trend for an increase in water levels has been revealed, against which periods of local unsteadiness are manifested, when a steady increase or decrease in the water level in the lake has been observed for several years. The obtained results allow us to further consider Umbozero, functioning mainly in a natural mode, as an analog lake in the study of large unexplored lakes of the Murmansk region.

Keywords: Lake Umbozero, water levels, variability of different scales, probabilistic analysis

Государственная программа «Социально-экономическое развитие арктической зоны Российской Федерации», действие которой продлено вплоть до 2024 года, предполагает оценку водных ресурсов региона в условиях изменяющегося климата и возрастающей антропогенной нагрузки. Озёра представляют собой ресурсы водоснабжения населения и промышленности, транспортные пути, являются регуляторами стока вытекающих рек, используются для

гидротехнического строительства, нужд энергетики и сельского хозяйства.

Уровень воды в больших озерах не только фиксирует водные ресурсы, но и служит интегральным показателем изменений климата на обширных территориях, что чрезвычайно важно при использовании озёрных вод в хозяйственных целях [1; 2].

Уровневый режим озёр формируется под воздействием активных (климатических) и адаптивных (подстилающая поверхность)

факторов [3-5]. В формировании климата европейской территории России большую роль играет Северо-Атлантическое колебание (САК) [6-8]. Основа САК заключается в перераспределении атмосферной влаги между Арктикой и субтропической Атлантикой. При этом переход САК из одной фазы в другую вызывает изменения в динамике большинства крупномасштабных атмосферных процессов. В свою очередь климатические факторы – температура воздуха и атмосферные осадки – воздействуют на колебания уровней озер.

Озеро Умбозеро находится в Ловозерском районе Мурманской области, в юго-западной части Кольского полуострова и принадлежит к бассейну Белого моря. Озеро имеет ледниково-тектоническое происхождение, занимая глубокую впадину между Хибинами на западе и тундрами Ловозерья на востоке. Это самое глубокое из больших озёр Кольского полуострова. Умбозеро – 4-е озеро Мурманской области и 42-е озеро России по площади водного зеркала. Общая площадь водосбора озера составляет 2131 км². Уровень воды не регулируется, годовая амплитуда – 1,2 м. Минимальные уровни наблюдаются в мае, до вскрытия, максимальные – в июле и связаны с пиком снеготаяния. На данном озере проводились преимущественно экологические и гидро-биологические изыскания.

В условиях слабой изученности озёр, которая значительно уступает изученности рек, чрезвычайную актуальность приобретает поиск озёр-аналогов. Озеро Умбозеро функционирует преимущественно в естественном режиме и может рассматриваться как озеро-эталон. Выявление закономерностей его функционирования позволит в дальнейшем существенно упростить исследование неизученных водоёмов. Одним из важнейших гидрологических и гидроэкологических показателей озера является уровень воды. Гидрологический режим озера Умбозеро изучен недостаточно. В связи с этим возникает необходимость оценки многолетних и внутригодовых уровней колебаний в условиях изменяющегося климата.

Особенности многолетних колебаний уровня Умбозера

Для анализа многолетней изменчивости уровня воды в озере использовались средние годовые значения высоты уровня $H(t)$, а также ежегодные последовательности средних величин для всех месяцев

года $H_i(t)$, где $i = 1, \dots, 12$. Эти ряды интерпретировались как близкие к стационарным случайным процессам, за основную вероятностную характеристику которых принимались функции распределения вероятностей значений высот уровня $F(H)$ и $F_i(H)$. Дополнительно для детализации особенностей многолетних изменений привлекался и ряд средних месячных уровней.

В работе использовались данные за период инструментальных наблюдений с 1946 по 2017 г. (70 лет). Для изучения структуры временных рядов выполнялась их фильтрация. Традиционно для этих целей применяются различные аппроксимирующие функции (кубические сплайны, преобразование Фурье). В данной работе проводилась фильтрация Баттерворта [9].

Для многолетней изменчивости уровня воды в Умбозере характерно наличие статистически значимого линейного тренда на повышение (рис. 1).

Аналогичные особенности присущи и для ежегодных последовательностей средних значений для всех месяцев года. Однако значимые тренды на повышение уровня наблюдаются только для января, февраля и июня, когда реки и озера рассматриваемого региона находятся на грунтовой питании, которое является естественным регулятором. Зимой дополнительное регулирующее влияние оказывает и ледостав.

Результаты низкочастотной фильтрации Баттерворта с частотой среза $\omega = 0,57$ рад./год позволили выявить периоды локальной нестационарности, когда в течение нескольких лет наблюдается устойчивое увеличение или уменьшение уровня воды в озере. Такие отрезки времени можно рассматривать как ветви «роста» и «спада» колебаний с периодом около 15 лет. Особенно четко такие флуктуации проявились с 1948 по 1962 год.

Для объяснения выявленных особенностей многолетних колебаний уровня озера привлекались данные наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях Мурманск, Ковдор, Каневка и Янискоски (рис. 2).

В используемых рядах температур воздуха и годовых сумм осадков есть пропуски, связанные с отсутствием наблюдений за отдельные месяцы некоторых лет, что не позволяет рассчитать средние годовые значения. Однако, учитывая, что имеющиеся пропуски находятся в различных частях ряда, можно допустить, что их влияние на оценку значимости тренда не существенно.



Рис. 1. Хронологический график хода средних годовых уровней воды озера Умбозера

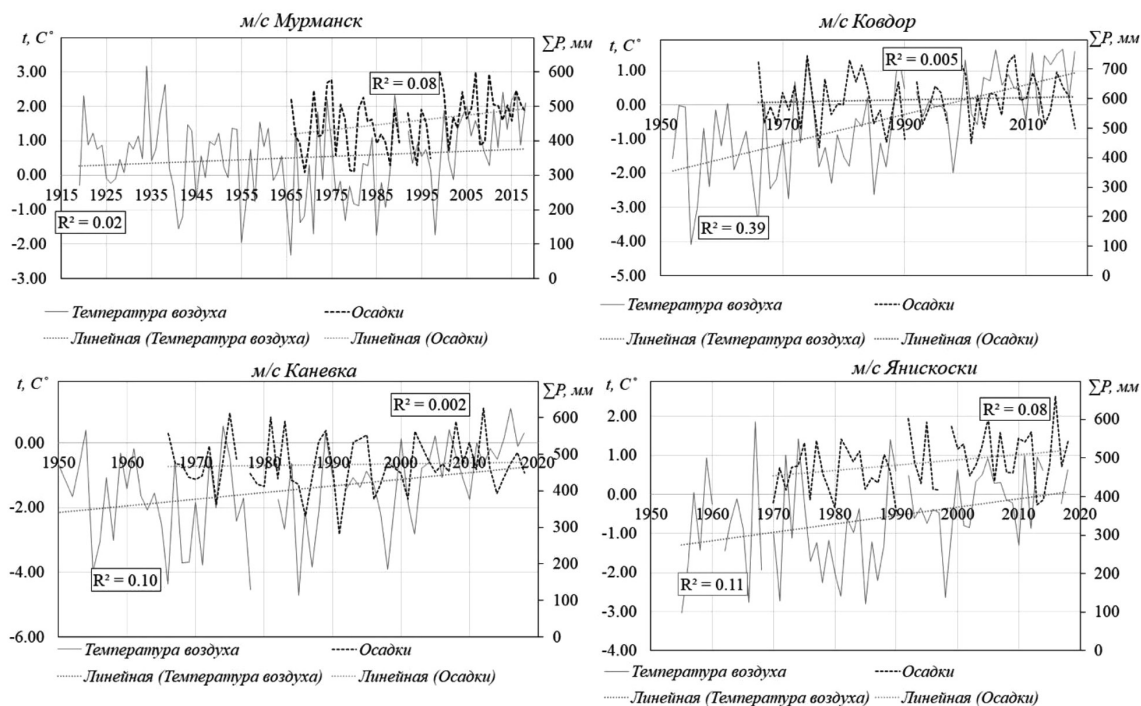


Рис. 2. Хронологические графики хода средних годовых температур воздуха и осадков

В рассматриваемом регионе наблюдается общее потепление климата. Для всех рядов средних годовых температур воздуха (кроме м/с Мурманск) характерен статистически значимый тренд на повышение, выраженный, однако, в разной степени для различных станций (табл. 1). Однако на фоне общего потепления наблюдается период относительного похолодания, особенно четко

выраженный на метеостанции Мурманск с 1940 по 1970 г. Увеличение осадков отмечается только для метеостанций Мурманск и Янискоски.

Отношение годовой суммы осадков (P , мм) к средней годовой температуре воздуха (T °C + 10 °C) (индекс де Мартона α^M) позволяет оценить общую увлажненность бассейна Умбозера (рис. 3).

Таблица 1

Статистические характеристики средних годовых значений температуры воздуха приземного слоя атмосферы и количества осадков за год

Средняя годовая температура воздуха						
м/с	среднее, 10°C	ско	Cv	Cs	R ² , для тренда	значимость тренда
Мурманск	0,5	1,11	2,29	-0,33	0,027	-
Каневка	-1,5	1,39	-0,95	-0,6	0,095	+
Янискоски	-0,7	1,17	-1,79	-0,22	0,147	+
Ковдор	-0,5	1,37	-2,76	-0,4	0,392	+
Количество осадков за год, мм						
м/с	среднее, мм	ско	Cv	Cs	R ² , для тренда	значимость тренда
Мурманск	491	82	0,17	-0,06	0,09	+
Каневка	484	61,3	0,13	0,32	0,04	-
Янискоски	518	73,4	0,14	0,44	0,09	+
Ковдор	598	83,16	0,14	-0,01	0	-

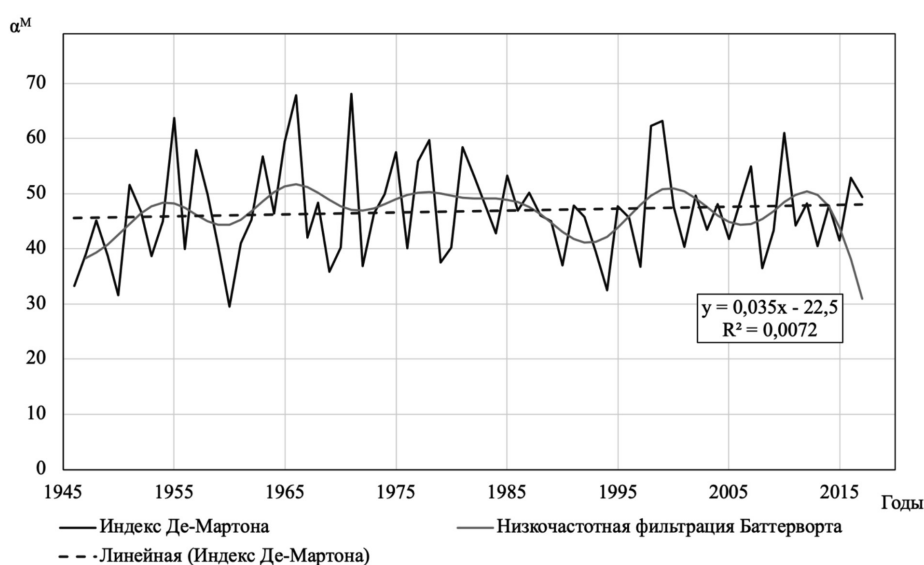


Рис. 3. Хронологический график изменения индекса де Мартона α_M по данным м/с Мурманск



Рис. 4. Хронологический график хода средних месячных уровней воды озера Умбозеро

Временной ряд индекса де Мартона (α^M), рассчитанный по данным наблюдений на ближайшей к озеру метеостанции, отражает незначительное увеличение увлажненности бассейна Умбозера и наличие периодов локальной нестационарности, совпадающих с аналогичными периодами в колебаниях уровня воды в озере.

Особенности внутригодовых колебаний уровня озера

Для анализа ритмики годовой цикличности уровня воды в озере Умбозеро использовался метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). Теория и методы ПКСП достаточно подробно изложены в работе [4]. Основными вероятностными характеристиками ПКСП являются математическое ожидание $m(t)$, дисперсия $D(t)$, матрица корреляционных зависимостей внутригодовой из-

менчивости $K(t, \tau)$. Оценки вероятностных характеристик ПКСП $m^*(t)$, $D^*(t)$, $K^*(t, \tau)$ вычислялись по ряду средних месячных высот уровней воды.

Поскольку ритмика годовой цикличности уровневых колебаний проявляется на фоне низкочастотных изменений, перед проведением расчетов характеристик внутригодового хода последовательно выполнялись низкочастотная и высокочастотная фильтрация Баттерворта с частотой среза $\omega = 0,57$ рад./год (рис. 4).

Отметим, что низкочастотная фильтрация Баттерворта с частотой среза $\omega = 0,57$ рад./год ряда средних месячных уровней позволила более детально выявить периоды локальной нестационарности многолетних колебаний.

На рис. 5 (а, б) представлены графики оценок математического ожидания и дисперсии внутригодовых колебаний уровня воды озера Умбозеро до и после фильтрации ряда.

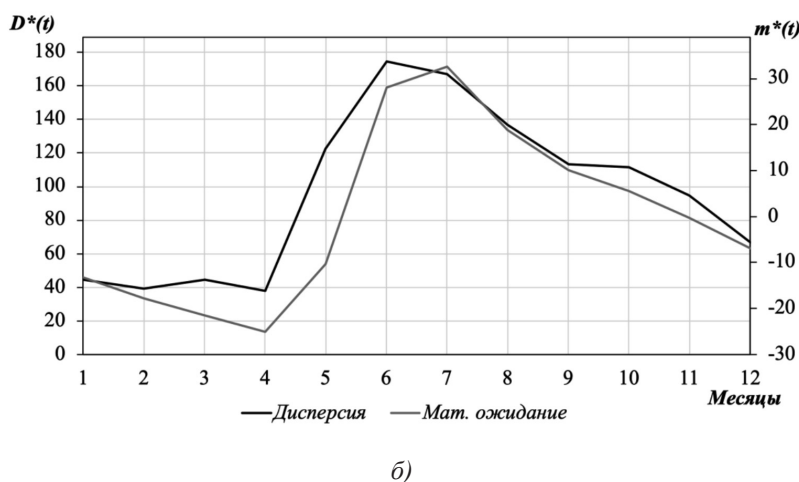
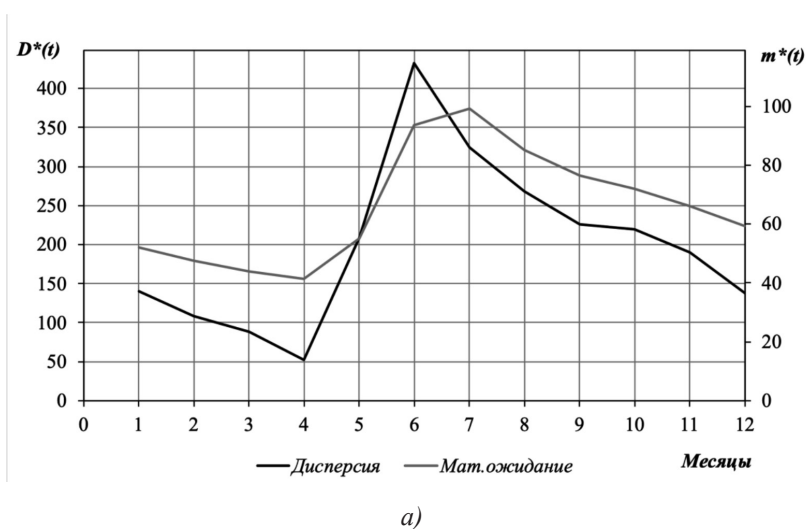
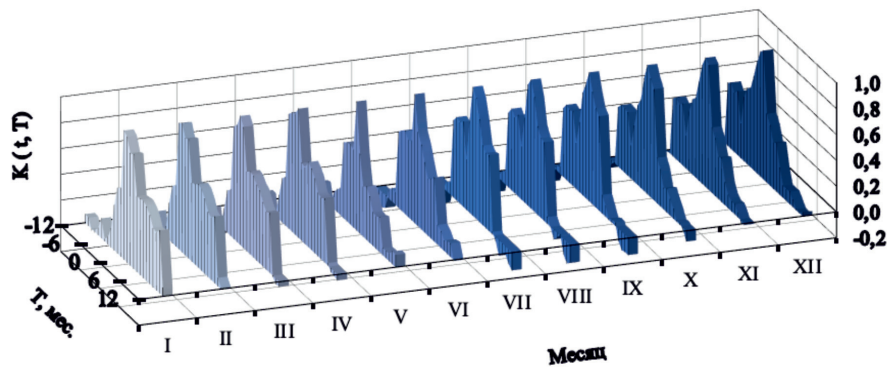
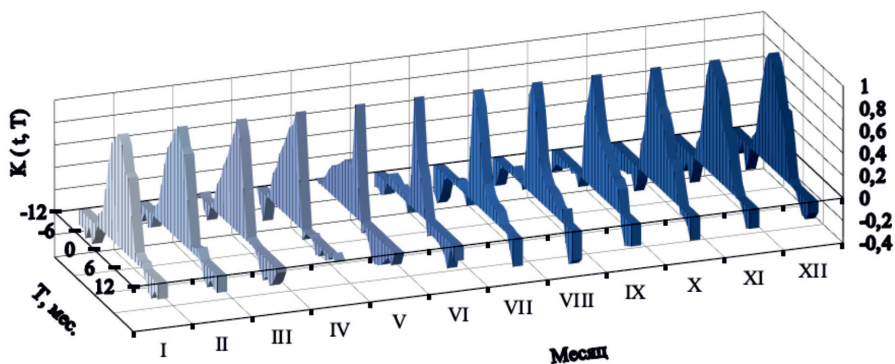


Рис. 5. Графики оценок математического ожидания и дисперсии среднемесячных уровней воды озера Умбозеро: а) до фильтрации; б) после фильтрации



а)



б)

Рис. 6. Графики оценок корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости уровней воды озера Умбозера: а) до фильтрации; б) после фильтрации

Таблица 2

Сравнение параметров авторегрессии AR(1) до и после фильтрации

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
До фильтрации	0,98	0,93	0,75	0,45	0,71	0,63	0,94	0,89	0,87	0,92	0,97	0,43
После фильтрации	0,93	0,84	0,86	0,42	0,28	0,47	0,87	0,77	0,75	0,84	0,92	0,94

Ход кривой $m^*(t)$ как до, так и после фильтрации имеет четко выраженный сезонный характер: максимум приходится на июль, минимум – на апрель. Амплитуда колебания оценки $m^*(t)$ после фильтрации не изменилась и составляет 58 см.

В отличие от хода кривой оценки дисперсии $D^*(t)$ до фильтрации, когда минимум достигается в апреле и совпадает с минимумом оценки $m^*(t)$, для кривой $D^*(t)$ после фильтрации характерно наличие периода минимальных значений с января по апрель. При этом максимум дисперсии до и после фильтрации приходится на июнь.

Амплитуда оценки дисперсии $D^*(t)$ после фильтрации значительно уменьшилась – с 380 до 137 см².

Для оценки внутригодовой коррелированности уровней воды в озере Умбозера были построены корреляционные зависимости $K^*(t, \tau)$ для рядов до фильтрации и после фильтрации (рис. 6 а, б).

В табл. 2 приведены параметры авторегрессии первого порядка AR(1), аппроксимирующие корреляционные зависимости, представленные на рис. 6.

Из табл. 2 следует, что параметры AR(1) не значимы в апреле и декабре до фильтра-

ции и с апреля по июнь после фильтрации. Корреляционная связь ослабевает в период прохождения весеннего половодья на реках, впадающих в озеро. В остальное время года, когда преобладающим источником питания являются грунтовые воды, корреляционная связь является тесной.

Данная статья является продолжением цикла, посвященного изучению уровневого режима озер России [10; 11]. Описание водного режима некоторых озер Кольского полуострова также представлено в работе [12].

Выводы

1. Потепление климата в бассейне Умбозера особенно четко выражено с начала 1970-х годов.

2. Многолетние изменения индекса де Мартона α^M и уровня воды в Умбозере достаточно хорошо согласуются и отражают увеличение увлажненности территории. Поэтому временной ход уровней воды в озере можно рассматривать как индикатор изменений климата в его бассейне.

3. Для внутригодового хода уровня воды в озере Умбозеро характерен максимум в июле, минимум – в апреле. Средняя многолетняя амплитуда колебания составляет 58 см при средней многолетней амплитуде дисперсии – 137 см².

Заключение

Полученные результаты позволяют в дальнейшем рассматривать Умбозеро, функционирующее преимущественно в естественном режиме, в качестве озера-аналога при исследовании больших неизученных озёр Мурманской области, что внесет определенный вклад в освоение арктической зоны.

В дальнейшем предполагается установить связь между уровнем воды и основными составляющими водного баланса Умбозера – речным притоком и стоком.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, № FSZU-2020-0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Список литературы / References

1. Мьякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: Гидрометеоиздат, 2009. 153 с.
Myakisheva N.V. Multicriteria classification of lakes. SPb.: Gidrometeoizdat, 2009. 153 p. (in Russian).
2. Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Георгиев Л.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Влияние изменений

климата на экосистемы озер севера европейской территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 48–55.

Filatov N.N., Rukhovets L.A., Nazarova L.E., Georgiev L.P., Efremova T.V., Palshin N.I. The impact of climate change on the ecosystems of lakes in the north of the European territory of Russia // Ucheniye zapiski RGGMU. 2014. No. 34. P. 48–55 (in Russian).

3. Лемешко Н.А., Сперанская Н.А. Особенности увлажнения Европейской территории России в условиях изменяющегося климата // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 38–54.

Lemeshko N.A., Speranskaya N.A. Features of humidification of the European territory of Russia in a changing climate // Sovremennyye problemy gidrometeorologii. SPb.: Asterion, 2006. P. 38–54 (in Russian).

4. Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 780 с.

Rozhkov V.A. Theory and methods of statistical estimation of probabilistic characteristics of random variables and functions with hydrometeorological examples. SPb.: Gidrometeoizdat, 2002. 780 p. (in Russian).

5. Филатов Н.Н., Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Назарова Л.Е., Синюкович В.Н. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России // ДАН. 2016. Т. 467. № 5. С. 589–593.

Filatov N.N., Vyvachalkina T.Yu., Diansky N.A., Nazarova L.E., Sinyukovich V.N. Intra-century variability of the level of the largest lakes in Russia // DAN. 2016. Vol. 467. № 5. P. 589–593 (in Russian).

6. Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 3–16.

Vyvachalkina T.Yu., Filatov N.N., Diansky N.A., Gusev A.V. On the forecast of long-term changes in the water level of large lakes // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2016. № 9. P. 3–16 (in Russian).

7. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Северо-Атлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. изд. Астерион № 2. 2014. С. 191–198.

Malinin V.N., Gordeeva S.M. North Atlantic oscillation and humidification of the European territory of Russia // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. izd. Asterion № 2. 2014. P. 191–198 (in Russian).

8. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание; атмосфера и океан. М.: Триада, ЛТД, 2013. 144 с.

Nesterov E.S. North Atlantic oscillation; atmosphere and ocean. M.: Triada, LTD, 2013. 144 p. (in Russian).

9. Butterworth S. On the theory of filter amplifiers. Experimental wireless (and the wireless engineer). 1930. Vol. 7. № 85. P. 536–541.

10. Мьякишева Н.В., Бирюкова В.А. Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России. I Озера Арктической зоны // Естественные и технические науки. 2018. № 12. С. 181–187.

Myakisheva N.V., Biryukova V.A. Different-scale variability of the water level in the lakes of Russia. I Lakes of the Arctic zone // Estestvennyye i tekhnicheskie nauki. 2018. № 12. P. 181–187 (in Russian).

11. Мьякишева Н.В., Давыденко Е.В., Орлов Д.А. Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России. II Ладожское озеро // Естественные и технические науки. 2020. № 12. С. 166–172.

Myakisheva N.V., Biryukova V.A. Different-scale variability of the water level in the lakes of Russia. II Ladoga Lake // Estestvennyye i tekhnicheskie nauki. 2020. № 12. P. 166–172 (in Russian).

12. Давыденко Е.В., Гайдуклова Е.В., Дрегваль М.С. Особенности уровневого режима озер Кольского полуострова // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 437–445.

Davydenko E.V., Gaidukova E.V., Dregval M.S. Features of the level regime of lakes of the Kola peninsula // Gidrometeorologiya i ekologiya. 2020. № 61. P. 437–445 (in Russian).