

Влияние метеорологических условий на формирование ледового режима Онежского озера

© 2019 г. В.Н. Баклагин

Институт водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия
slava.baklagin@mail.ru

Influence of meteorological conditions on the formation of ice regime of the Lake Onega

V.N. Baklagin

Institute of Northern Water Problems, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia
slava.baklagin@mail.ru

Received December 7, 2018 / Revised March 29, 2019 / Accepted June 13, 2019

Keywords: *air temperature, ice regime, Lake Onega, snow depth.*

Summary

The formation of the ice regime on large lakes is mostly determined by the complex meteorological processes occurring over the water area. Previous studies of the air temperature influence on the ice regime formation on the Lake Onega were based on observational data on the state of the ice cover in the Petrozavodsk Bay, as well as the materials of the rare missions of aerial reconnaissance performed in the second half of the XX century. So, it was necessary to revise the previously established dependencies using the present-day satellite data for 2000–2018, and to determine the nature of influence of other meteorological factors, among which a thickness of the snow cover on the Lake area. The authors obtained regularities of changes in the characteristic dates (complete freeze-up – ± 5 days/ $^{\circ}\text{C}$ and final clearing of ice – ± 3 days/ $^{\circ}\text{C}$) of the ice regime on the Lake Onega, depending on changes in the average air temperature that preceded these dates (autumn and spring) for the period of two months. The regression equations to calculate these dates on the basis of the previous three - and four-month periods from the data of 2000–2018 are also given. Relative to the above mentioned results for the previous period, a certain shift by a month ahead of two- and three- period exerting influence on the date of the complete freeze-up is noted. Dependencies to calculate the cumulative daily temperatures for the period of the ice regime formation (the beginning of the formation of ice phenomena, complete freeze-up phase, the beginning of the break-up phase, clearing of the ice) were also deduced. Together with the data on the expected air temperature over the Lake these dates provide a potential possibility to estimate (predict) the characteristic dates of the ice regime. The significant influence of the average snow cover thickness on the process of destruction of the ice cover was shown, and the nature of the statistical relationship (along with the air temperature) was also determined.

Citation: Baklagin V.N. Influence of meteorological conditions on the formation of the ice regime at the Lake Onega. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (4): 546–556. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-413>.

Поступила 7 декабря 2018 г. / После доработки 29 марта 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

Ключевые слова: *ледовый режим, Онежское озеро, температура воздуха, толщина снежного покрова.*

Установлены статистические взаимосвязи между метеорологическими параметрами (температура воздуха, снегонакопление) и характеристиками ледового режима Онежского озера за 2000–2018 гг. Приведены регрессионные уравнения для расчёта характерных дат ледового режима, а также сумм накопления положительных и отрицательных температур воздуха над его акваторией во время формирования ледяного покрова.

Введение

Ледяной покров на озёрах существенно влияет на различные обменные процессы между атмосферой и водной поверхностью: снижает поступление солнечного света в водные массы, необходимого для фотосинтеза, а также затрудняет теплообмен и насыщение воды кислородом. Условия развития ледового режима на озёрах определяют продолжи-

тельность навигационного периода, а также возможность транспортировки людей и/или грузов по установившемуся льду [1–3]. Сведения, полученные при оценке характеристик ледового режима, применимы в климатических моделях, а также могут быть использованы для прогнозирования сроков замерзания и вскрытия озёр [2, 4]. Процессы формирования и разрушения ледяного покрова на крупных озёрах во многом определяются ком-

плексом метеорологических процессов, происходящих над акваторией озёр [2, 5]. Именно поэтому исследования, посвящённые влиянию климатических факторов на многолетнюю изменчивость ледового режима озёр, имеют большой научный интерес. Основная тенденция при оценке влияния изменения климата на многолетнюю изменчивость ледового режима крупных озёр — снижение продолжительности периода ледовых явлений в результате глобального потепления последних десятилетий [6–9]. При этом в работе [10] отмечается, что лёд крупных озёр — чувствительный индикатор изменения климатических условий, причём более надёжный, чем температура воздуха.

Онежское озеро — одно из крупнейших озёр Европы, площадь его акватории составляет 9720 км². Выяснение закономерностей формирования ледового режима Онежского озера имеет большое значение при решении региональных практических задач, связанных с организацией транспортного водного сообщения между крупными населёнными пунктами, среди которых — Петрозаводск, Медвежьегорск, Кондопога, Повенец, Вытегра, Вознесенье, а также на трассах Беломоро-Балтийского и Волго-Балтийского водных путей [2].

Исследования многолетней изменчивости ледового режима озёр на территории Республики Карелия, в том числе Онежского озера, описаны в работе [8], авторы которой установили, что за 1950–2009 гг. продолжительность ледовых явлений на Онежском озере снизилась более чем на 20 дней. Установленные закономерности при оценке влияния температуры воздуха на формирование и разрушение ледяного покрова показывают, что для Онежского озера средние значения температуры воздуха в течение двух месяцев с ноября по декабрь лучше всего отражают даты замерзания, а с апреля по май — даты вскрытия. При этом изменение средней температуры воздуха на ± 1 °C способствует изменению дат замерзания на $\pm 4 \div 6$ дней, а дат вскрытия на $\pm 3 \div 4$ дня [8]. Результаты этих исследований получены по данным визуальных наблюдений за состоянием ледяного покрова озёр с постов наблюдений Росгидромета России. Это применимо к небольшим озёрам, которые полностью попадают в зону видимости наблюдателей постов. Для Онежского озера наблюдения ведутся только за состоянием ледяного покрова Петрозаводской губы, площадь акватории которой составляет менее 2% площади аква-

тории всего озера, что не показательно при оценке характерных сроков ледового режима.

В работе [2] для получения данных о многолетней изменчивости ледового режима Онежского озера использованы результаты ледовых авиаразведок, выполненных отделом авиационных исследований Северо-Западного территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу природной среды за период 1955–1990 гг. На основе этих данных установлены связи характерных сроков и продолжительности ледовых явлений с температурой воздуха (на ГМС Петрозаводск) и значениями индекса NAO (Northern Atlantic Oscillation — Североатлантическое колебание), что также имеет большой научный интерес. Данные, полученные при картировании ледяного покрова Онежского озера и использованные в работе [2], имеют недостаточный временной шаг для достоверной оценки характерных сроков ледового режима и анализа хронологического хода ледовитости (5–10 авиаразведок за период ледообразования), поскольку скорость изменения ледовитости Онежского озера может достигать нескольких десятков процентов за сутки. Максимальное изменение ледовитости Онежского озера за сутки в 2000–2018 гг. составляет 62,5% (зафиксировано датчиком MODIS с 8 по 9 января 2016 г.).

Современные методы получения информации о ледяном покрове озёр предполагают использование данных спутниковых наблюдений [1, 3, 4]. В последние несколько лет с помощью спутников выполняется ежедневная съёмка Земли в различных диапазонах (видимом, инфракрасном, микроволновом) и накоплен большой объём данных, в том числе и о снежном и ледяном покровах планеты. Необходимо актуализировать имеющиеся исследования [2, 8] путём применения современных спутниковых данных и уточнить ранее установленные связи. Следует проанализировать возможное влияние не только температурного режима, но и других метеорологических факторов (ветер и толщина снежного покрова) на процессы формирования и разрушения ледяного покрова Онежского озера, поскольку данный вопрос недостаточно затронут в имеющихся работах. Цель настоящего исследования — установить статистические взаимосвязи между метеорологическими параметрами и характеристиками ледового режима Онежского озера, рассчитанными на основе спутниковых данных за период 2000–2018 гг.

Материалы и методы

Определение характерных сроков ледового режима Онежского озера. Площади ледовых образований на Онежском озере могут изменяться стремительно (до 63% за сутки), поэтому расчёт характеристик ледового режима Онежского озера за 2000–2018 гг. выполнен на основе суточного ряда значений ледовитости, полученного по ежедневным данным спутниковых наблюдений. Авторы статьи использовали наборы спутниковых данных, предоставленные: Национальной воздухоплавательной и космической администрацией США NASA (датчик MODIS, с пространственным разрешением до 250 м); Национальным центром данных по снегу и льду NSIDC (4–6 км); Центром спутниковых приложений и исследований NOAA NESDIS (4–6 км). Методика формирования суточного ряда значений ледовитости Онежского озера на основе этих наборов данных с минимизацией погрешности при определении ледовитости приведена в работе [11].

Начало установления полного ледостава в данном исследовании не всегда фиксировалось

при достижении значения ледовитости 100%. В отдельные годы в процессе формирования льда на акватории Онежского озера из-за сильного ветра образовывались крупные трещины (с появлением участков акватории, свободных ото льда), которые в результате термогидродинамических процессов длительное время не покрывались льдом (от трёх до семи дней). Поскольку данное исследование предусматривает установление влияния метеоусловий на ледовый режим Онежского озера, во избежание погрешностей, связанных с сильным ветром, считалось, что в подобных случаях дата полного ледостава соответствует моменту времени, когда акватория озера полностью покрыта льдом, за исключением образовавшихся трещин (значение ледовитости соответствует 93–98%). В некоторые годы вскрытию Онежского озера предшествовало незначительное разрушение льда в районе Свирской губы, поэтому в эти годы дата начала вскрытия фиксировалась при значении ледовитости 99%. Именно поэтому характерные даты ледового режима (рис. 1) в некоторые годы незначительно отличаются (не более восьми дней)

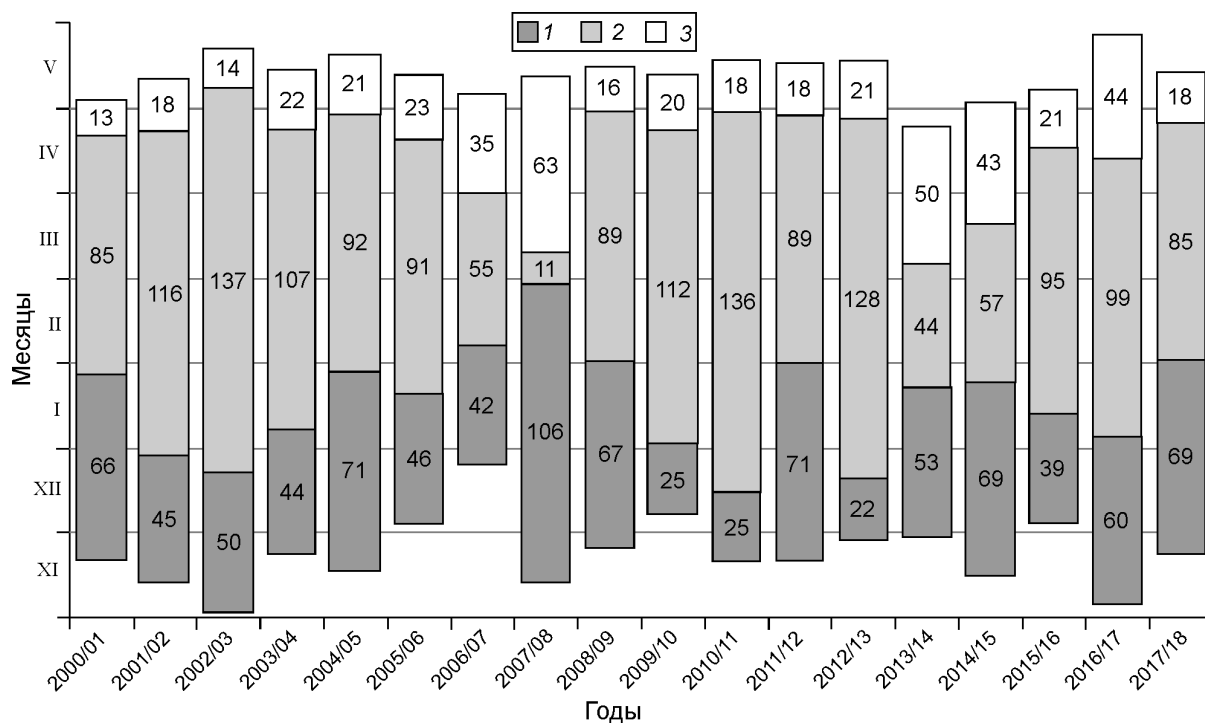


Рис. 1. Даты начала конца и продолжительности (с указанием числа дней) периодов формирования (1), разрушения (3) ледяного покрова и полного ледостава (2) на Онежском озере за период 2000–2018 гг.

Fig. 1. The dates of the beginning and the ending of phases as well as the duration of the phases (the number of days is indicated) of ice formation (1), complete freeze-up (3) and break-up (2) on Lake Onego for the period 2000–2018

от приведённых в работе [11]. За исследуемый интервал времени (2000–2018 гг.) продолжительность периода ледовых явлений варьировала в диапазоне 132–203 дня при среднем значении 171 день, коэффициент вариации равен 10%, период полного ледостава составляет от 11 до 137 дней при среднем значении 90 дней, коэффициент вариации – 36%.

Для комплексной оценки изменения ледовитости в период ледовых явлений были рассчитаны суммы суточных значений ледовитости за каждый период ледовых явлений по формуле $\sum ice = \sum_{k=1}^n ice_k$, где ice_k – значение ледовитости в k -й день периода ледовых явлений, n – продолжительность периода ледовых явлений. Величины $\sum ice$ и RICИ (относительный показатель ледяного покрова – Relative ice cover index (RICI), методика расчёта которых использована для оценки ледового режима Ладожского озера [1], схожи, поскольку значения RICИ для каждого года получены нормированием величины $\sum ice$ на среднее значение $\overline{\sum ice}$ за некий рассматриваемый период. Однако для установления статистических связей в настоящем исследовании нет необходимости в нормировании величин $\sum ice$.

Оценка метеоусловий над акваторией Онежского озера. В настоящем исследовании использованы ежедневные данные о среднесуточной температуре воздуха, осадках, толщине снежного покрова за период 2000–2017 гг., полученные в метеорологических пунктах наблюдений у городов Петрозаводск и Вытегра и предоставленные ВНИИГИ-МЦД (<http://meteo.ru>). Ежедневные данные о среднесуточной температуре воздуха, среднесуточной скорости ветра за период 2000–2018 гг., полученные в метеорологических пунктах наблюдений у городов Петрозаводск, Медвежьегорск, Вытегра, Пудож, предоставлены Национальным центром климатических данных NOAA США (NCDC NOAA) (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/>). Метеоусловия над акваторией Онежского озера оценивали путём осреднения метеопараметров, полученных в равно удалённых друг от друга пунктах наблюдений на побережье озера (рис. 2): у городов (с индексом ВМО) Петрозаводск (22820), Медвежьегорск (22721), Вытегра (22837), Пудож (22831). Выбор нескольких пунктов наблюдений для оценки метеопараметров обусловлен разны-



Рис. 2. Расположение метеорологических пунктов наблюдений на побережье Онежского озера

Fig. 2. The location of meteorological observation points on the coast of Lake Onego

ми климатическими условиями, формирующимися в каждой части акватории озера, что связано со значительной протяжённостью Онежского озера (с севера на юг – 248 км, с запада на восток – 96 км). Так, среднее значение температуры воздуха по данным ВНИИГИ-МЦД и NCDC NOAA за период 2000–2017 гг. в районе г. Медвежьегорск составляет 3,11 °С, г. Петрозаводск – 3,89 °С, г. Вытегра – 4,06 °С.

Среднегодовые значения всех рассматриваемых метеопараметров рассчитывались за период с 1 июня текущего года по 31 мая следующего года. Это связано с тем, что к 31 мая Онежское озеро всегда полностью освобождается ото льда.

Таким образом, учтено влияние метеопараметров не только во время всего периода ледовых явлений, но и в предшествующий ему безледоставный период, который также играет важную роль при формировании ледового режима озёр.

Даты начала и окончания периодов с суммами накопления положительных ΣT_+ и отрицательных температур ΣT_- воздуха определялись

из условия $\sum_{t_1}^{t_2} |T_t| \rightarrow \max$, где t_1, t_2 – соответ-

ственно даты начала и конца периодов в текущем гидрологическом году, T_t – среднесуточная температура воздуха на дату t . Согласно расчётам, за период 2000–2018 гг. даты перехода температуры воздуха над акваторией Онежского озера через 0°C к отрицательным значениям находятся в диапазоне от 14 октября до 25 ноября, к положительным – от 4 марта до 21 апреля. Среднее значение продолжительности периода с суммами накопления положительных (тёплого сезона) температур воздуха составляет 220 дней, отрицательных (холодного сезона) – 144 дня, что согласуется с результатами работы [12]. Средняя продолжительность периода ледовых явлений на Онежском озере (171 день) больше продолжительности периода суммарного накопления отрицательных температур воздуха над его акваторией. Статистические характеристики сумм накопления положительных и отрицательных температур воздуха над акваторией Онежского озера за 2000–2018 гг. приведены на рис. 3.

Таблица 1. Температурный режим над акваторией Онежского озера в разные временные периоды

Период	Среднее значение температуры воздуха, $^\circ\text{C}$		Разность, $^\circ\text{C}$
	1936–1999 гг.	2000–2018 гг.	
За год	2,7	3,6	0,9
Тёплый сезон	9,6	10,4	0,8
Холодный сезон	-8,2	-6,8	1,4

Расчёты показали, что за период 2000–2018 гг. максимальные абсолютные значения сумм накопления положительных температур воздуха над акваторией Онежского озера $\Sigma T_{+\max}$ колебались от 1932 до 2527 $^\circ\text{C}$, а отрицательных температур $\Sigma T_{-\max}$ – от -1520 до -553 $^\circ\text{C}$. Согласно анализу метеоусловий, над акваторией Онежского озера температурный фон в период 2000–2018 гг. был в среднем выше на $0,9^\circ\text{C}$ по сравнению с периодом 1936–1999 гг. (с использованием ежедневных данных ВНИИГИ-МЦД о средней температуре воздуха за период 1936–1999 гг.) (табл. 1). При этом повышение среднего значения температуры воздуха в 2000–2018 гг. обусловлено в основном тёплыми зимами, часто повторяющимися в последние годы.

Кроме того, холодные сезоны значительно отличаются друг от друга по температурному режиму (коэффициент вариации $\Sigma T_{-\max}$ за 2000–2018 гг. составляет 32%), в то время как в тёплые сезоны средняя температура воздуха не так изменчива (коэффициент вариации $\Sigma T_{+\max}$ за 2000–2018 гг. составляет 7%).

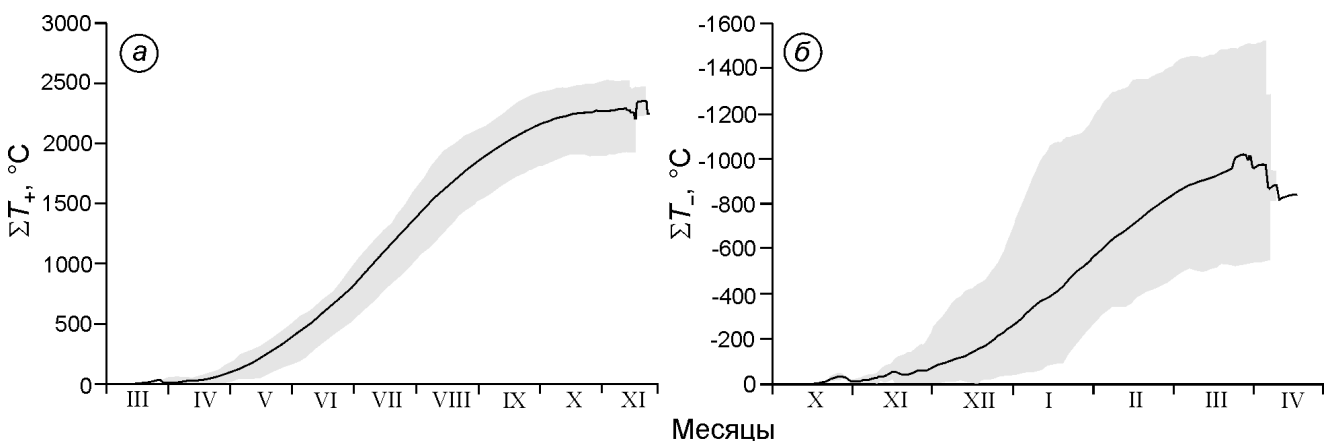


Рис. 3. Интегральные кривые положительных (а) и отрицательных (б) температур воздуха над акваторией Онежского озера с коридором колебаний за 2000–2018 гг.

Fig. 3. Integral curves of positive (a) and negative (b) air temperatures over Lake Onego with the corridor of vibrations for the period 2000–2018

Средние значения скорости ветра над акваторией Онежского озера каждый месяц приблизительно одинаковы (1,78 м/с). Ежедневные данные о скорости ветра, полученные в четырёх рассматриваемых пунктах метеонаблюдений, значительно отличаются друг от друга. Например, коэффициент парной корреляции ежедневных рядов среднесуточных скоростей ветра в районах городов Медвежьегорск и Вытегра за 2000–2018 гг. составляет лишь 0,43, в то время как для аналогичных рядов среднесуточных температур воздуха коэффициент парной корреляции равен 0,97. Согласно данным метеонаблюдений, в 2000–2018 гг. в южной и юго-восточной частях Онежского озера снегонакопление было практически одинаковым. Средняя толщина снежного покрова у городов Петрозаводск и Вытегра, накопленная за холодный сезон, составила 47 см, минимальная – 28 см (2017 г.), максимальная – 62 см (2004 г.). В настоящем исследовании в качестве толщины снежного покрова на площади озера принимались осреднённые значения, полученные в метеорологических пунктах у городов Петрозаводск и Вытегра.

Результаты и обсуждения

Наиболее значимый метеопараметр, влияющий на формирование ледового режима озера, – температура воздуха над его акваторией [1–3, 8]. Корреляционный анализ показал, что величины Σ_{ice} , продолжительность ледостава D (дни) и периода ледовых явлений L (дни) на Онежском озере имеют весьма тесные (в меньшей степени с L) корреляционные связи со среднегодовым значением температуры воздуха над его акваторией \bar{T} (коэффициенты парной корреляции соответственно составляют $-0,89$, $-0,83$ и $-0,50$). При этом наиболее тесная корреляционная связь наблюдается между величинами \bar{T} и Σ_{ice} . В результате регрессионного анализа установлены соотношения, связывающие величины Σ_{ice} и D (дни) со среднегодовым значением температуры воздуха над акваторией озера \bar{T} , °С:

$$\Sigma_{ice} = -0,548\bar{T}^2 - 17,566\bar{T} + 188,649;$$

$$D = -3,894\bar{T}^2 - 3,782\bar{T} + 157,531.$$

Коэффициенты детерминации полученных регрессионных моделей равны соответственно 0,80 и 0,70.

Таблица 2. Закономерности изменения характерных дат (даты установления ледостава и полного очищения) ледового режима на Онежском озере в зависимости от изменения средней температуры воздуха за разные периоды

Период	Коэффициент парной корреляции	Изменения дат при изменении средней температуры воздуха на ± 1 °С, дни	
		1950–2009 гг.	2000–2018 гг.
Ноябрь–декабрь	0,76	$\pm 4 \div 6$	± 5
Декабрь–январь	0,88	–*	± 5
Апрель–май	$-0,52$	$\pm 3 \div 4$	± 3
Апрель	$-0,59$	–	± 3

*Прочерки здесь и в табл. 4 означают, что данная информация не указывалась в публикациях [2, 8]; возможно, расчёты для приведённых периодов не выполнялись.

В результате корреляционного и регрессионного анализов установлены зависимости изменения характерных дат ледового режима Онежского озера от температурного режима над его акваторией. Уравнение множественной регрессии для расчёта даты начала формирования ледовых образований на Онежском озере имеет следующий вид (коэффициент детерминации – 0,56):

$$D_{freezing} = 0,049\bar{T}_{XII} + 2,293\bar{T}_{XI} + 1,374\bar{T}_X - 5,402\bar{T}_{IX} - 1,927, \quad (1)$$

где $D_{freezing}$ – продолжительность периода с 1 октября до начала формирования ледовых образований, дни; \bar{T}_i – средняя температура воздуха над акваторией озера в i -й месяц, °С.

Тесная статистическая связь (коэффициент парной корреляции 0,76) установлена также между средней температурой воздуха за двухмесячный период (с ноября по декабрь \bar{T}_{XI-XII}) и датами начала установления ледостава на озере в 2000–2018 гг. Получена зависимость изменения этих дат от величины \bar{T}_{XI-XII} , которая согласуется с результатами подобного исследования ледового режима Онежского озера за период 1950–2009 гг. [8] (табл. 2). Опытным путём установлено, что наиболее тесную корреляционную связь (0,88) с датами начала установления ледостава на Онежском озере в 2000–2018 гг. имеет средняя температура воздуха над его акваторией за более поздний, по сравнению с исследованиями работы [8], двухмесячный период – с декабря по январь \bar{T}_{XII-I} (см. табл. 2).

Учёт влияния температур воздуха за четырёхмесячный период (октябрь–январь) по сравнению с периодом, рассматриваемым в иссле-

довании ледового режима Онежского озера за 1955–1990 гг. (октябрь–декабрь) [2], позволил улучшить качество регрессионной модели (коэффициент детерминации увеличился с 0,74 до 0,80) для расчёта даты установления полного ледостава на Онежском озере D_{ice} (без учёта индекса NAO):

$$D_{ice} = 1,572\bar{T}_I + 2,703\bar{T}_{XII} - 0,331\bar{T}_{XI} + 1,071\bar{T}_X + 134,420. \quad (2)$$

Смещение периода, влияющего на дату формирования ледостава, на месяц вперёд по сравнению с рассматриваемыми периодами в исследованиях [2, 8] (трёх- и двухмесячного соответственно), возможно, связано с поздними датами установления ледостава на Онежском озере в 2000–2018 гг. (в среднем 16 января), чем в предшествующие годы в результате существующей тенденции к сокращению продолжительности периода ледовых явлений на крупных озёрах, обусловленной глобальным потеплением [6–9]. Кроме того, расчёты характеристик ледового режима Онежского озера в работе [8] выполнены на основе наблюдений за состоянием ледяного покрова Петрозаводской губы, которая из-за своего морфологического строения покрывается льдом гораздо раньше, чем акватория озера в целом.

Уравнение множественной регрессии для расчёта дат начала разрушения ледяного покрова на Онежском озере имеет следующий вид (коэффициент детерминации – 0,45):

$$D_{break} = -2,300\bar{T}_{III} - 1,156\bar{T}_{II} - 1,671\bar{T}_I + 10,108, \quad (3)$$

где D_{break} – продолжительность периода, начиная с 1 марта до начала разрушения ледяного покрова, дни.

Средняя по значению корреляционная связь (–0,52) установлена между датами полного очищения ото льда на Онежском озере и средней температурой воздуха за двухмесячный период (апрель–май) \bar{T}_{IV-V} . Значения изменения дат полного очищения озера ото льда в зависимости от изменения величины \bar{T}_{IV-V} , полученные при регрессионном анализе, выполненном в настоящем исследовании, несколько ниже приведённых в работе [8]. Кроме того, замечено, что незначительному увеличению значения данной статистической связи способствует учёт только апрельских температур воздуха (см. табл. 2). Приведём уравнение множественной регрессии для

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции максимальных H_{max} и средних \bar{H} значений толщины снежного покрова на площади Онежского озера за холодный сезон с некоторыми величинами, характеризующими особенности ледового режима озера

Параметры	H_{max}	\bar{H}
Сумма суточных значений ледовитости за период ледовых явлений Σice	0,50	0,76
Продолжительность периода с 1 апреля до наступления полного очищения озера ото льда D_{free}	0,65	0,77
Продолжительность периода с 1 марта до начала разрушения ледяного покрова на озере D_{break}	0,52	0,65
Суммы накопления положительных температур воздуха над акваторией Онежского озера на момент полного освобождения озера ото льда ΣT_{free}	0,44	0,66
Суммы накопления положительных температур воздуха над акваторией Онежского озера на начало разрушения ледяного покрова ΣT_{break}	0,41	0,53

расчёта дат полного очищения Онежского озера ото льда (коэффициент детерминации – 0,62):

$$D_{free} = -1,039\bar{T}_V - 3,572\bar{T}_{IV} - 1,098\bar{T}_{III} + 57,209, \quad (4)$$

где D_{free} – продолжительность периода с 1 апреля до наступления полного очищения озера ото льда, дни.

Установлено значимое влияние снегонакопления (хотя и в меньшей степени по сравнению с температурой воздуха) на формирование ледового режима озера. Результаты корреляционного анализа максимального H_{max} и среднего \bar{H} значения толщины снежного покрова за холодный сезон на площади озера с различными характеристиками ледового режима Онежского озера приведены в табл. 3. Заметная (по шкале Чеддока) статистическая связь между величинами \bar{H} и Σice показывает, что снежный покров, образовавшийся на установившемся ледяном покрове Онежского озера, влияет на развитие ледовых образований на озере. Наличие большого объёма накопившегося снега на ледяном покрове озёр затрудняет разрушение льда в весенний период, что подтверждает тесная корреляционная связь (0,66) между величиной \bar{H} и значениями сумм накопления положительных температур воздуха, необходимых для полного очищения озера ото льда ΣT_{free} . В результате при большей средней толщине снега на площади озера полное очищение наступает позднее.

Корреляционные связи величины \bar{H} с различными характеристиками ледового режима

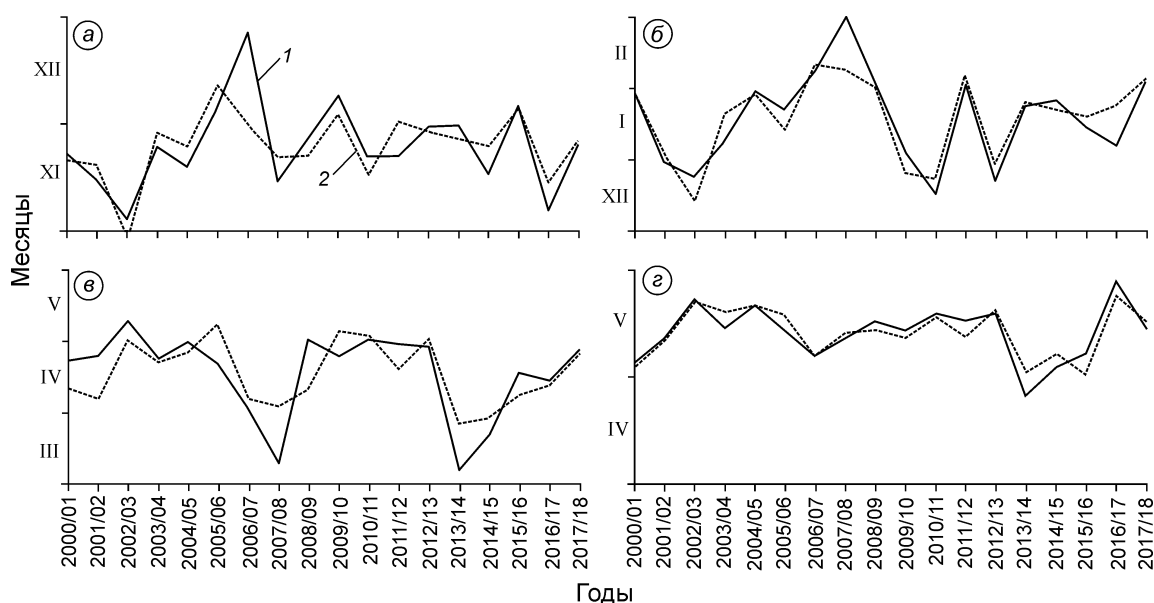


Рис. 4. Фактические (1) и расчётные даты на основе представленных регрессионных моделей (2): а – начала формирования ледовых явлений; б – начала установления ледостава; в – начала разрушения ледяного покрова; г – начала полного очищения ото льда на Онежском озере за период 2000–2018 гг.

Fig. 4. Actual (1) and predicted on the basis of the provided regression models (2) indicative dates: а – beginning of the ice phenomena formation; б – beginning of complete freeze-up phase; в – beginning of the ice rotting; г – beginning of clearing of ice on Lake Onega for the period 2000–2018

несколько выше, чем H_{\max} . Вероятно, это объясняется тем, что средняя толщина снежного покрова в отличие от максимального учитывает динамику снегонакопления на площади озера за весь холодный сезон, в том числе и в его начале. Снежный покров затрудняет проникновение солнечного света в толщу воды и способствует росту толщины льда, поэтому наличие снежного покрова в начале холодного сезона может способствовать образованию более толстого льда, что влияет на различные характеристики ледового режима озера. Учёт влияния величины \bar{H} (см) на процессы разрушения ледовых образований на Онежском озере позволил улучшить качество регрессионных моделей для расчёта величин D_{break} и D_{free} (коэффициенты детерминации увеличились до 0,52 и 0,81 соответственно):

$$D_{break} = -1,017\bar{T}_V - 0,855\bar{T}_{IV} - 1,231\bar{T}_{III} + 1,929\bar{H} + 2,704; \quad (5)$$

$$D_{free} = -1,083\bar{T}_V - 2,073\bar{T}_{IV} - 0,082\bar{T}_{III} + 1,334\bar{H} + 44,509. \quad (6)$$

Фактические и расчётные, на основе представленных в работе регрессионных уравнений, характерные даты ледового режима Онежско-

го озера приведены на рис. 4. Средние значения абсолютных отклонений расчётных значений от фактических составляют: а) при определении даты начала формирования ледовых образований – 5–6 дней; б) при определении даты установления ледостава – 6–7 дней; в) при определении даты начала разрушения ледяного покрова – 8–9 дней; г) при определении даты полного очищения озера ото льда – 2–3 дня. Прогнозирование дат ледового режима Онежского озера с использованием полученных регрессионных уравнений для расчётов $D_{freezing}$, D_{ice} , D_{break} и D_{free} не оправдано, поскольку в большинстве случаев прогнозируемая дата предшествует используемым в качестве входных данных периодам, на которые рассчитываются средние значения температур воздуха. Например, в некоторые годы периода 2000–2018 гг. полный ледостав устанавливался в середине–конце декабря (см. рис. 1), что исключает влияние январских температур на его формирование, значения которых включены (в виде \bar{T}_I) в уравнение для расчёта величины D_{ice} , уравнение (2). Значительная корреляционная связь (0,88) в данном случае, вероятно, объясняется обратным влиянием установившегося ледостава на озере на снижение

Таблица 4. Значения сумм накопления температур воздуха над акваторией Онежского озера в моменты характерных дат ледового режима за разные временные периоды

Суммы накопления температур воздуха над акваторией Онежского озера, °С	Периоды	
	1955–1990 гг.	2000–2018 гг.
На начало формирования ледяного покрова $\Sigma T_{freezing}$	–	–43 ÷ –15
На момент установления полного ледостава ΣT_{ice}	–490 ÷ –290	–500 ÷ –275
На начало разрушения ледяного покрова ΣT_{break}	–	0–115
На момент полного освобождения озера ото льда ΣT_{free}	200–310	87–294

температуры воздуха над его акваторией. В связи с этим в данном исследовании выполнен анализ сумм накопления положительных и отрицательных температур воздуха характерных дат ледового режима Онежского озера, который позволит установить статистические зависимости, пригодные для адекватного прогноза характерных дат ледового режима, основанного на данных о температурном режиме периодов, предшествующих прогнозируемым датам.

Значения сумм накопления отрицательных и положительных температур воздуха в моменты характерных дат ледового режима Онежского озера за 2000–2018 гг. по сравнению с периодом 1955–1990 гг., согласно исследованиям [2], представлены в табл. 4. Рассчитанные интервалы величин ΣT_{ice} и ΣT_{free} за 2000–2018 гг. согласуются с результатами подобных исследований формирования ледового режима Онежского озера [2]. Существенные различия в значениях нижней границы интервала величины ΣT_{free} (см. табл. 4) обусловлены наличием аномально низких значений ΣT_{+} в 2013 и 2014 гг., при которых фиксировалось полное очищение Онежского озера ото льда (ΣT_{free} соответственно 87 и 92 °С). В свою очередь в эти годы вскрытию озера предшествовали аномально тёплые зимы – суммы накопления отрицательных температур воздуха за холодный сезон ΣT_{-max} имели минимальные значения за 2000–2018 гг. (около –555 °С) при среднем значении –970 °С за этот период.

Суммы накопления отрицательных температур воздуха над акваторией озера, которые требуются для появления ледовых образований $\Sigma T_{freezing}$ и установления полного ледостава на

озере ΣT_{ice} , вероятно, зависят от тепловых запасов озера на начало данного холодного сезона. Корреляционный анализ между величинами ΣT_{ice} и ΣT_{+max} над акваторией Онежского озера не выявил статистически значимой связи (коэффициент парной корреляции – 0,01). Опытным путём установлено, что величина ΣT_{ice} имеет наиболее тесную корреляционную связь со средним значением положительных температур воздуха над акваторией озера за последние 55 дней тёплого сезона (до перехода в сторону отрицательных значений) \bar{T}_{55} ; коэффициент парной корреляции между этими величинами составляет –0,70. Коэффициент парной корреляции величин $\Sigma T_{freezing}$ и \bar{T}_{55} равен –0,57. Возможно, такая заметная (по шкале Чеддока) статистическая связь объясняется тем, что высокие положительные температуры воздуха над акваторией Онежского озера в осенний период в среднем за период 2000–2018 гг. (сентябрь–октябрь) препятствуют быстрому остыванию воды в озере, сохраняя накопившееся за лето тепло. Поэтому для дальнейшего снижения температуры поверхности воды до 0 °С и процесса формирования льда требуется большее значение сумм накопления отрицательных температур воздуха ΣT_{-} . Описанное явление может иметь место в осенний период с наступлением внезапной зимы и сопровождается быстрым переходом от умеренных положительных температур воздуха (5–10 °С) к отрицательным, минуя малые положительные (0–5 °С).

В результате регрессионного анализа получены уравнения, связывающие величины $\Sigma T_{freezing}$ (°С) и \bar{T}_{55} (°С) (коэффициент детерминации – 0,33), а также величины ΣT_{ice} (°С) и \bar{T}_{55} (°С) (коэффициент детерминации – 0,53) для Онежского озера:

$$\Sigma T_{freezing} = 0,218 \bar{T}_{55}^2 - 5,062 \bar{T}_{55} - 7,768; \quad (7)$$

$$\Sigma T_{ice} = 3,421 \bar{T}_{55}^2 - 66,994 \bar{T}_{55} - 116,855. \quad (8)$$

Для установления статистической связи между величинами ΣT_{-max} и ΣT_{free} , а также ΣT_{-max} и ΣT_{break} для Онежского озера проведён корреляционный анализ, в результате которого выявлены значительные (по шкале Чеддока) статистические связи: коэффициент парной корреляции величин ΣT_{-max} и ΣT_{free} составляет –0,75; ΣT_{-max} и ΣT_{break} – –0,78. На основе регрессионного анализа получены уравнения, связывающие величины

$\Sigma T_{-\max}$ ($^{\circ}\text{C}$), \bar{H} (см) и ΣT_{free} ($^{\circ}\text{C}$) (коэффициент детерминации – 0,70), а также величины $\Sigma T_{-\max}$ ($^{\circ}\text{C}$), \bar{H} (см) и ΣT_{break} ($^{\circ}\text{C}$) (коэффициент детерминации – 0,78):

$$\Sigma T_{\text{break}} = -4,4703 \cdot 10^{-7} \Sigma T_{-\max}^3 - 0,0015 \Sigma T_{-\max}^2 - 1,6186 \Sigma T_{-\max} + 0,3340 \bar{H}^2 - 9,8102 \bar{H} - 481,072, \quad (9)$$

$$\Sigma T_{\text{free}} = -4,8006 \cdot 10^{-8} \Sigma T_{-\max}^3 - 0,0003 \Sigma T_{-\max}^2 - 0,5960 \Sigma T_{-\max} - 0,4510 \bar{H}^2 + 9,2555 \bar{H} - 161,431. \quad (10)$$

Полученные уравнения для расчёта $\Sigma T_{\text{freezing}}$, ΣT_{ice} , ΣT_{break} , ΣT_{free} с учётом данных об ожидаемой температуре воздуха потенциально могут быть использованы для прогнозирования характерных дат ледового режима Онежского озера. Средние значения абсолютных отклонений расчётных сумм накопления температур воздуха от фактических составляют: а) на начало периода формирования ледовых явлений – 5–6 $^{\circ}\text{C}$; б) на момент установления ледостава – 38–39 $^{\circ}\text{C}$; в) на начало периода разрушения ледяного покрова – 12–13 $^{\circ}\text{C}$; г) на момент полного очищения озера ото льда – 27–28 $^{\circ}\text{C}$.

Заключение

Статистический анализ взаимосвязей между метеорологическими параметрами и характеристиками ледового режима Онежского озера за 2000–2018 гг. подтвердил, что температура воздуха – наиболее значимый метеорологический фактор, влияющий на формирование ледового режима озера. Зависимости характерных дат ледового режима Онежского озера от температуры воздуха согласуются с результатами, полученными ранее в работах [2, 8], однако установлено, что в 2000–2018 гг. произошло смещение периода, влияющего на дату формирования ледостава, на месяц вперёд по сравнению со второй половиной XX в., рассмотренной в исследованиях [2, 8]. Это указывает на изменение климата, способствующее наступлению поздней зимы и, как следствие, смещению дат установления ледостава за последние десятилетия, что согласуется с концепцией глобального потепления [6–9]. Поэтому можно сделать вывод, что модели формирования ледяного покрова Онежского озера, представленные в работах [2, 8], требуют некоторой корректировки для применения их в настоящее время.

Полученные в работе уравнения для расчёта характерных дат ледового режима (1)–(6) мало пригодны для прогноза, однако их можно использовать в диагностических целях, например для реконструкции многолетних временных рядов характеристик ледового режима Онежского озера на основе имеющихся ежедневных данных о температурном режиме воздуха. Это актуально для первой половины XX в. – периода, для которого есть лишь отдельные данные о состоянии ледяного покрова Петрозаводской губы Онежского озера и материалы редких вылетов авиаразведок; спутниковые наблюдения отсутствовали. Прогнозирование характерных дат ледового режима Онежского озера потенциально возможно на основе приведённых в работе уравнений для расчёта сумм накопления температур воздуха (7)–(10) в период формирования ледового режима Онежского озера совместно с данными об ожидаемых температурах воздуха. Это может иметь практическое применение при планировании навигационного периода и организации путей водного сообщения.

Вместе с температурой воздуха значимый фактор при разрушении ледяного покрова – среднее значение толщины снежного покрова (даже более важный, чем её максимальное значение) на площади озера за зимний период. В частности, при большем среднем значении толщины снежного покрова требуется большее значение сумм накопления положительных температур воздуха для разрушения ледяного покрова озера (коэффициент корреляции – 0,66).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских учёных МК-3379.2018.5. Автор выражает благодарность сотрудникам ИВПС КарНЦ РАН: главному гидрологу – Валентине Алексеевне Карпечко и ведущему гидрологу – Наталии Ивановне Махальской за консультативную помощь в подготовке материалов.

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation to support young Russian scientists МК-3379.2018.5. The author is grateful to the staff members of the NWPI KRC of RAS: the chief hydrologist – Karpechko Valentina Alekseevna and the leading hydrologist – Makhalskaya Natalia Ivanovna for the advice on the preparation of materials.

Литература

1. *Karetnikov S.G., Naumenko M.A.* Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiologia*. 2008. V. 599. № 1. P. 41–48. doi: 10.1007/s10750-007-9211-1.
2. *Сало Ю.А., Назарова Л.Е.* Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера в условиях нестационарности регионального климата // *Изв. РГО*. 2011. Т. 143. Вып. 3. С. 50–55.
3. *Assel R., Drobot S., Croley II T.E.* Improving 30-day Great Lakes ice cover outlooks // *Journ. of Hydrometeorology*. 2004. V. 5. P. 713–717. doi: 10.1175/1525-7541(2004)005<0713:IDGLIC>2.0.CO;2.
4. *Baklagin V.N.* Selection of parameters and architecture of multilayer perceptrons for predicting ice coverage of lakes // *Ekológia (Bratislava)*. 2017. V. 36. № 3. P. 226–234. doi: 10.1515/eko-2017-0019.
5. *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 // *Hydrological Processes*. 2011. V. 25. P. 2942–2953. doi: 10.1002/hyp.8068.
6. *Brown L.C., Duguay C.R.* The response and role of ice cover in lake-climate interactions // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2010. V. 34. Is. 5. P. 671–704. doi: 10.1177/0309133310375653.
7. *Latifovic R., Pouliot D.* Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 106. Is. 4. P. 492–507. doi: 10.1016/j.rse.2006.09.015.
8. *Efremova T.V., Palshin N.E., Zdorovenov R.E.* Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // *Estonian Journ. of Earth Sciences*. 2013. V. 62. № 1. P. 33–41. doi: 10.3176/earth.2013.04.
9. *Magnuson J.J., Benson B.J., Kratz T.K.* Temporal coherence in the limnology of a suite of lakes in Wisconsin, U.S.A. // *Freshwater Biology*. 1990. V. 23. Is. 1. P. 145–159. doi: 10.1111/j.1365-2427.1990.tb00259.x.
10. *Livingstone D.M.* Break-up of alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures // *Climatic Change*. 1997. V. 37. Is. 2. P. 407–439.
11. *Баклагин В.Н.* Изменчивость ледовитости Онежского озера в период 2000–2018 гг. по спутниковым данным // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 552–558. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-552-558.
12. *Nazarova L.E.* Climate change and fluctuations in the Karelian-Kola region // *Environment. Technology. Resources. Proc. of the 9th Intern. Scientific and Practical Conf.* 2013. V. 1. P. 53–56. doi: 10.17770/etr2013vol1.820.

References

1. *Karetnikov S.G., Naumenko M.A.* Recent trends in Lake Ladoga ice cover. *Hydrobiologia*. 2008, 599 (1): 41–48. doi: 10.1007/s10750-007-9211-1. [In Russian].
2. *Salo Yu.A., Nazarov L.E.* Multiannual variability of the Onega Lake ice regime in conditions of variability of the regional climate. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva. Proc. of the Russian Geographical Society*. 2011, 143 (3): 50–55. [In Russian].
3. *Assel R., Drobot S., Croley II T.E.* Improving 30-day Great Lakes ice cover outlooks. *Journ. of Hydrometeorology*. 2004, 5: 713–717. doi: 10.1175/1525-7541(2004)005<0713:IDGLIC>2.0.CO;2.
4. *Baklagin V.N.* Selection of parameters and architecture of multilayer perceptrons for predicting ice coverage of lakes. *Ekológia (Bratislava)*. 2017, 36 (3): 226–234. doi: 10.1515/eko-2017-0019.
5. *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. *Hydrological Processes*. 2011, 25: 2942–2953. doi: 10.1002/hyp.8068.
6. *Brown L.C., Duguay C.R.* The response and role of ice cover in lake-climate interactions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2010, 34 (5): 671–704. doi: 10.1177/0309133310375653.
7. *Latifovic R., Pouliot D.* Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. *Remote Sensing of Environment*. 2007, 106 (4): 492–507. doi: 10.1016/j.rse.2006.09.015.
8. *Efremova T.V., Palshin N.E., Zdorovenov R.E.* Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Estonian Journ. of Earth Sciences*. 2013, 62 (1): 33–41. doi: 10.3176/earth.2013.04.
9. *Magnuson J.J., Benson B.J., Kratz T.K.* Temporal coherence in the limnology of a suite of lakes in Wisconsin, U.S.A. *Freshwater Biology*. 1990, 23 (1): 145–159. doi: 10.1111/j.1365-2427.1990.tb00259.x.
10. *Livingstone D.M.* Break-up of alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change*. 1997, 37 (2): 407–439.
11. *Baklagin V.N.* Variability of the Lake Onega ice coverage in the period 2000–2018 according to the satellite data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018., 58 (4): 552–558. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-552-558. [In Russian].
12. *Nazarova L.E.* Climate change and fluctuations in the Karelian-Kola region. *Environment. Technology. Resources. Proc. of the 9th Intern. Scientific and Practical Conf.* 2013, 1: 53–56. doi: 10.17770/etr2013voll1.820.