

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.70>

УМЕНЬШЕНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕГИОНА КАК СЛЕДСТВИЕ ДЕГРАДАЦИИ ЛЕДНИКОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Научная статья

Ташилова А.А.^{1,*}, Кешева Л.А.², Теунова Н.В.³

¹ ORCID : 0000-0002-2368-6047;

² ORCID : 0000-0002-5132-1563;

³ ORCID : 0000-0002-1135-3587;

^{1,2,3}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tashilovaa[at]mail.ru)

Аннотация

Конец 20-го и начало 21 вв. характеризуются многими крупномасштабными природными изменениями, в том числе, в горных криосистемах. Криосистема высокогорья реагирует на изменение климата и прежде всего – на долговременный рост летней температуры приземного воздуха, которая увеличилась за последние 60 лет в горах Кавказа на 0,5-0,7°C. В данной работе показано, что за последние 20 лет к летним температурам добавился рост зимней и весенней температур на значимом уровне, что на фоне незначительного снижения количества всех сезонных осадков приводит к таянию ледников и уменьшению запасов водного баланса. По результатам расчетов получено, что за последние ~20 лет, составившие треть от всего периода с 1957 до 2020 гг., уменьшение баланса воды ледника Большой Азау составило 260 млн. тонн, что больше половины за весь период – 476,25 млн. тонн.

Ключевые слова: водный баланс, климатические изменения, деградация ледников, Северный Кавказ.

THE REDUCTION OF WATER RESOURCES IN THE REGION AS A CONSEQUENCE OF DEGRADATION OF GLACIERS OF THE NORTHERN CAUCASUS UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE

Research article

Tashilova A.A.^{1,*}, Kesheva L.A.², Teunova N.V.³

¹ ORCID : 0000-0002-2368-6047;

² ORCID : 0000-0002-5132-1563;

³ ORCID : 0000-0002-1135-3587;

^{1,2,3}High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (tashilovaa[at]mail.ru)

Abstract

The late 20th and early 21st centuries are characterized by many large-scale natural changes, including in mountain cryosystems. High altitude cryosystems respond to climate change and, above all, to the long-term increase in summer surface air temperature, which has increased over the past 60 years in the Caucasus Mountains by 0.5-0.7°C. This work shows that over the last 20 years the summer temperatures have been supplemented by a significant increase in winter and spring temperatures, which led to melting of glaciers and reduction of the water balance in the face of insignificant decrease in all seasonal precipitation. According to the results of calculations, over the past ~20 years, which amounted to one-third of the entire period from 1957 to 2020, the decrease in water balance of Big Azau Glacier was 260 million tons, which is more than half of the entire period – 476.25 million tons.

Keywords: water balance, climate change, glacier degradation, North Caucasus.

Введение

Одним из наиболее характерных индикаторов изменения климата является таяние ледников: с начала 20 века за последние 30 лет исчезло более 20 % европейских ледников [1].

Понимание того, что происходит с ледниками, нужно для того, чтобы спрогнозировать изменения водного баланса территорий. Это особенно актуально для регионов, в которых таяние ледников – источник пресной воды.

В докладе МГЭИК [2] отмечается, что с высокой степенью достоверности местные темпы потепления зависят от сезона. Например, было обнаружено, что в Европейских Альпах потепление более выражено летом и весной [3], [4], также как на Кавказе [5], тогда как на Тибетском нагорье потепление сильнее зимой [6], [7].

В связи с этим особый интерес представляет изучение современного изменения сезонного и регионального климата и его влияния на процессы, происходящие в криосфере, приводящие к таянию ледников в высокогорных районах Кавказа.

Методы и принципы исследования

Для определения климатических характеристик (сезонные температуры, осадки), влияющих на ледники бассейна реки Баксан (Большой Азау, Ирик, Щхельда и др.) в качестве основного источника информации использовались ряды наблюдений на метеостанции «Терскол» (2144 м) (архив Эльбрусского противоловинного отряда Северо-Кавказской военизированной службы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы).

Оценка коэффициентов линейных трендов метеопараметров получена методом наименьших квадратов и выражена в °C/10 лет (b) и в мм/мес/10 лет. Значимость тренда определяется величиной коэффициента детерминации R^2 (или вкладом тренда в объясненную дисперсию D (%)) по критерию Фишера:

$$F = (R^2 / (1 - R^2)) \cdot ((n - m) / m),$$

где n – число наблюдений; m – число параметров при факторе x ; x – независимый параметр регрессии.

Табличное значение критерия Фишера (F -критерий) определяет его максимальное значение, при котором влияют случайные факторы. Если фактический критерий меньше его табличного значения $F_{\text{факт.}} < F_{\text{табл.}}$, то на сложившийся характер поведения величины, на ее изменение не влияют случайные факторы. Эта величина зависит от степени свободы ($df = n - m - 1$) и выбранного уровня значимости $\text{Sig.}(0,05)$.

Основные результаты

По данным м/станции Терскол (Кабардино-Балкария, 2144 м н.у.м., высокогорный район с резко выраженным континентальным климатом и вертикальной зональностью) среднегодовая температура за 1961-2021 гг. составила 2,64°C при климатической норме 2,54°C. В отличие от зимнего, весеннего и осеннего сезонов, в летние сезоны 1961-2021 гг. средние температуры Терскола имели положительный значимый тренд. Скорость роста летних температур за период 1961-2021 гг. составила 0,32°C/10 лет ($D=39\%$), увеличиваясь с 1976 года до 0,43°C/10 лет ($D=44\%$, максимальный из всех сезонных трендов). В работе [5] отмечается, что по данным м/станции Терскол с середины 90-х годов по настоящее время в ряду летних температур преобладают положительные температурные аномалии. Если рассматривать сезон аккумуляции ледяных масс (октябрь-апрель), то на фоне долговременного с 1961 года незначительного роста осадков (18,3 мм/10 лет, $D=4,8\%$), с начала 2000-х гг. имело место уменьшение зимних сумм осадков, продолжающееся в настоящий период.

В период с 1976 г. имело место статистически значимая скорость роста (b) среднегодовой температуры на $b=0,2^\circ\text{C}/10$ лет с высоким вкладом в объясненную дисперсию $D=17\%$. С увеличением длительности подпериодов (1976-2013, 1976-2014, ..., 1976-2021 гг.) скорость роста годовой температуры Терскола росла, приближаясь к статистически значимому: в 1976-2013 гг. на $0,06^\circ\text{C}/10$ лет ($D=3\%$); в 1976-2014 гг. на $0,11^\circ\text{C}/10$ лет ($D=4\%$); ...; в 1976-2021 гг. на $0,20^\circ\text{C}/10$ лет ($D=17\%$).

При выделении подпериода 2001-2021 гг., отличающегося усиленным таянием ледников Кавказа, из рисунка 1 можно заметить, что скорость роста годовой температуры в Терсколе увеличилась до $0,70^\circ\text{C}/10$ лет ($D=32,9\%$, $F_{\text{факт.}}=8,97 > F_{\text{теор.}}=4,67$ для $df=20$, что определяет тренд средних годовых температур как статистически значимый). Также имело место увеличение роста зимних ($0,16^\circ\text{C}/\text{год}$, $D=25,1\%$) и весенних ($0,08^\circ\text{C}/10$ лет, $D=23,4\%$) температур до статистически значимого уровня. Летние температуры продолжают расти, но тренд статистически незначим ($0,04^\circ\text{C}/\text{год}$, $D=14,3\%$). Таким образом, за последние 20 лет в зимние, весенние и летние сезоны наблюдался рост температур на значимом уровне потепления, сравнимый с другими климатическими зонами.

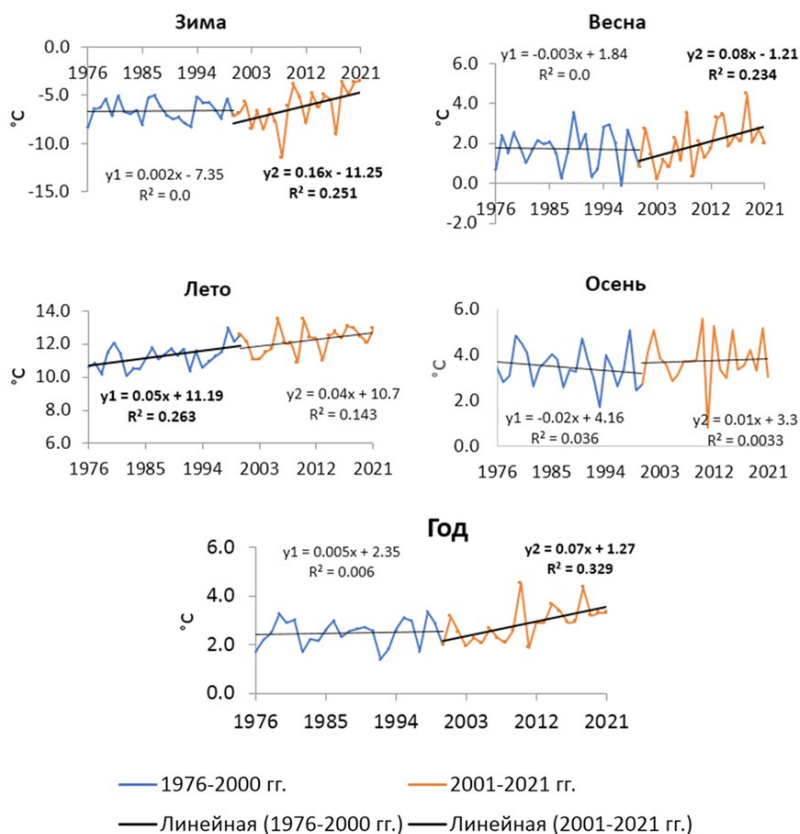


Рисунок 1 - Графики средней температуры в Терсколе в 1976-2021 гг. с трендами в подпериоды 1976-2000 гг. (y_1) и 2001-2021 гг. (y_2)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.70.1>

Примечание: жирным выделены значимые тренды на 5%-ном уровне

М/станция Терскол характеризуется достаточно большим количеством годовых сумм осадков (970,7 мм). С 1961 по 2021 гг. в Терсколе сохранялся незначимый рост суммы годовых осадков на 16,9 мм/10 лет ($D=3,1\%$), в 1976-2021 гг. скорость роста годовых сумм осадков снизилась до 16,5 мм/10 лет. За длительный период наблюдения с 1961 г. по 2021 г. тренды в зимних и летних суммах осадков отсутствовали, весенние и осенние суммы осадков незначительно увеличивались.

Из таблицы 1 видно, что в период с 2001 по 2021 гг. на фоне значимого роста сезонных температур изменение суммы осадков как сезонных, так и годовых, имели отрицательные тенденции, все тенденции статистически незначимые (таблица 1).

Таблица 1 - Параметры изменения суммы осадков, Терскол

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.70.2>

| Сезон | Период | | Подпериоды | | | |
|-------|----------------|--------------|---------------|---------|---------------|---------|
| | 1976-2021 гг. | | 1976-2000 гг. | | 2001-2021 гг. | |
| | b^* , мм/год | D^{**} , % | b , мм/год | D , % | b , мм/год | D , % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Зима | -0,31 | 0,3 | 0,2 | 12,3 | -2,12 | 5,6 |
| Весна | 1,71 | 6,9 | -0,02 | 2,2 | -2,26 | 2,7 |
| Лето | -0,31 | 0,4 | -0,36 | 0,12 | -1,02 | 2,5 |
| Осень | 0,27 | 1,7 | 1,85 | 2,1 | -2,74 | 4,0 |
| Год | 1,64 | 1,6 | -0,22 | 0,0 | -6,2 | 4,6 |

Примечание: * отрицательный тренд выделен серой заливкой; ** значимый тренд на 5%-ном уровне ($Sig.<0.05$) выделен жирным

Для исследуемого региона в формировании водных ресурсов в современный период особо важную роль играет не только долговременный (60 лет) значимый рост летней температуры, но и значительный рост зимней, весенней, летней и годовой температур за последние 20 лет, происходящий на фоне практически неизменного или незначительного снижения количества осадков, что приводит к интенсивному таянию ледников, питающих реки.

Для расчетов изменения водного баланса при деградации долинных ледников Центрального Кавказа были выбраны ледники бассейна реки Баксан для того, чтобы оценить влияние изменения горного климата по данным м/станции Терскол, расположенной в Баксанском ущелье. Из данных по деградации долинных ледников Большого Кавказа, приведенных Докукиным М.Д. в [8], были использованы значения уменьшения площадей ледников (ΔS , км²) для расчета среднего, минимального и максимального значений изменения водного баланса (тонн воды) в результате потери ледяного панциря ледников за последние ~60 лет.

По рекомендации авторов [8], при расчетах использовалась толщина долинных ледников в бассейне р. Баксан $h=75$ м. Тогда уменьшение среднего объема ледника Большой Азау, составило:

$$\Delta V = \Delta S h = 6,35 \text{ км}^2 \cdot 0,075 \text{ км} = 0,47625 \cdot 10^9 \text{ м}^3$$

или с учетом того, что $1 \text{ м}^3 = 1 \text{ т}$ воды,

масса воды: $m = 476250000$ тонн.

Таким образом, за последние 60 лет в результате таяния ледника Большой Азау (Центральный Кавказ, долина р. Баксан) баланс воды уменьшился на 476,25 млн. тонн.

Для сравнения темпов таяния приведем результаты расчетов по изменению водного баланса ледников Большой Азау и Терскол за последние 20 лет (с 1997 по 2017 гг.), используя данные изменения объема ледяного панциря (ΔV , км³) из работы Кутузова С.С. [9].

Снижение водного баланса в результате таяния ледника Большой Азау с 1997 по 2017 гг. в среднем составило 260 млн. тонн, что больше половины величины 476,25 млн. тонн (уменьшение за 1957 по 2020 гг.).

Для остальных ледников бассейна р. Баксан уменьшение их водного баланса в результате таяния с 1957 по 2020 гг. представлено в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что второе по величине сокращение водного баланса за период 1957-2020 гг. происходило за счет таяния ледника Каяартыбаши. Среднее значение составило 92,25 млн. тонн при максимальном снижении на 98,25 млн. тонн и минимальном – на 86,25 млн. тонн. С 1957 по 2020 гг. на леднике Чегеткарачиран среднее значение уменьшения составило 2,26 млн. тонн воды (от максимального 2,40 млн. тонн до минимального 2,10 млн. тонн). Ледник Шхельда за период с 1960 по 2020 гг. потерял в среднем 93 млн. тонн водного запаса, а ледник Большой Тютю (с 1962 по 2020 гг.) – 44,25 млн. тонн.

Таблица 2 - Уменьшение водного баланса ледников в результате таяния

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.70.3>

| № | Название ледника | Снижение запаса воды, млн. тонн | | |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|
| | | среднее | максимум | минимум |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| с 1957 по 2020 гг. | | | | |
| 1 | Большой Азау | 476,25 | 491,25 | 461,25 |
| 2 | Ирик | 59,25 | 63,00 | 55,50 |
| 3 | Чегеткарачиран | 2,26 | 2,40 | 2,10 |
| 4 | Юсенги | 16,50 | 18,00 | 15,00 |
| 5 | Шхельда (с 1960 по 2020 гг.) | 93,00 | 96,00 | 90,00 |
| 6 | Башкара | 27,75 | 29,25 | 26,25 |
| 7 | Юномсу | 33,00 | 34,50 | 31,50 |
| 8 | Большой Тютю (с 1962 по 2020 гг.) | 44,25 | 47,25 | 41,25 |
| 9 | Каяартыбаши | 92,25 | 98,25 | 86,25 |
| | Сумма | 844,51 | 879,9 | 809,1 |
| с 1997 по 2017 гг. | | | | |
| 10 | Большой Азау | 260 | 380 | 140 |
| 11 | Терскол | 80 | 130 | 30 |

Таким образом, за последние ~20 лет, составившие треть от всего периода с 1957 по 2020 гг., уменьшение баланса воды ледника Большой Азау (260 млн. тонн) составило больше половины баланса за весь период (476,25 млн. тонн). Вероятно, такое же распределение уменьшения водного баланса за счет таяния ледников имело место и для других ледников.

Обсуждение

Проблема такого интенсивного таяния ледников заключается в его последствиях. По мере того как ледники сокращаются в ответ на потепление климата, вода высвобождается из долговременных запасов ледников. Сначала ледниковый сток увеличивается, однако через несколько лет или десятилетий наступит переломный момент, часто называемый «пиком воды», после которого ледниковый сток и, следовательно, его вклад в речной сток вниз по течению уменьшится.

Результаты глобального моделирования показывают, что пик воды был достигнут до 2019 года для 55-67% ледников в Центральной Европе и на Кавказе [10]. В Третьем оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории РФ отмечается, что с учетом тенденций изменения годового стока рек в последние десятилетия высока вероятность усугубления проблемы водообеспеченности ряда южных регионов европейской территории России, которая уже в настоящее время является низкой, а может стать катастрофически низкой [11].

Заключение

Изменения климата и вызванная ими деградация ледников продолжают, при этом темпы этих процессов увеличиваются. С начала текущего столетия в Терсколе в зимние, весенние и летние сезоны наблюдался рост температур на значимом уровне потепления, сравнимый с другими климатическими зонами. Такой сезонный рост температуры сформировал статистически значимый рост среднегодовой температуры на м/станции Терскол в последние 20 лет (0,07°C/год, $D=32,9\%$). В период с 2001 по 2021 гг. на фоне значимого роста сезонных температур сумма осадков как всех сезонных, так и годовых имела отрицательные тенденции, все тенденции статистически незначимые.

Сложившийся термический режим и режим осадков в последние десятилетия явился основной составляющей из многих факторов, приводящих к сокращению площади ледников и изменению водного баланса.

В сумме за последние 60 лет ледники бассейна реки Баксан потеряли 844,51 млн. тонн воды, из них на ледник Большой Азау пришлось 476,25 млн. тонн воды. За последние 20 лет Большой Азау потерял 260 млн. тонн воды, что составило более половины потерь за третью часть времени от всего исследованного периода, что, вероятно, происходило и со всеми другими ледниками Кавказа.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Glaciers // Grind. — URL: www.grid.unep.ch/glaciers (accessed 07.10.2022)
2. МГЭИК, 2019 г.: Резюме для политиков. В: Специальный отчет МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата / Под ред. Н.-О. Пёртнер, Д.С. Робертс, В. Массон-Дельмотт и др.

3. Auer I. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region / I. Auer et al. // *Int. J. Climatol.* — 2007. — 27(1). — p.17-46. — DOI: 10.1002/joc.1377.
4. Ceppi P. Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008 / P. Ceppi, S.C. Scherrer, A.M. Fischer et al. // *Int. J. Climatol.* — 2012. — 32(2). — p. 203–213. — DOI: 10.1002/joc.2260.
5. Tashilova A.A. Analysis of climate change in Terskol over the last 60 years / A.A. Tashilova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* — 840(2021). — p. 012038. — DOI: 10.1088/1755-1315/840/1/012038.
6. Liu X. Elevation dependency of recent and future minimum surface air temperature trends in the Tibetan Plateau and its surroundings / X. Liu, Z. Cheng, L. Yan et al. // *Glob. Planet. Change.* — 2009. — 68(3). — p. 164–174. — DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.03.017.
7. Xu Y. Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols / Y. Xu, V. Ramanathan, W.M. Washington // *Atmos. Chem. Phys.* — 2016. — 16(3). — p. 1303–1315. — DOI: 10.5194/acp-16-1303-2016.
8. Беккиев М.Ю. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа / М.Ю. Беккиев, М.Д. Докукин, Р.Х. Калов и др. // *Фундаментальная и прикладная климатология.* — 2021. — Т. 8. — 3. — с. 113-141. — DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141
9. Kutuzov S. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 / S. Kutuzov, I. Lavrentiev, A. Smirnov et al. // *Front. Earth Sci.* — 2019. — 7. — p. 153. — DOI: 10.3389/feart.2019.00153.
10. Huss M. A new model for global glacier change and sea-level rise / M. Huss, R. Hock // *Front. Earth Sci.* — 2015. — 3. — p. 54. — DOI: 10.3389/feart.2015.00054.
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — СПб.: Научно-исследовательские технологии, 2022. — 124 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Glaciers // Grind. — URL: www.grid.unep.ch/glaciers (accessed 07.10.2022)
2. MGEIK, 2019 g.: Rezyume dlya politikov. V: Special'nyj otchet MGEIK ob okeane i kriosfere v usloviyah menyayushchegosya klimata [IPCC 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate] / Ed. by H.-O. Pörtner, D.S. Roberts, W. Masson-Delmotte et al. [in Russian]
3. Auer I. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region / I. Auer et al. // *Int. J. Climatol.* — 2007. — 27(1). — p.17-46. — DOI: 10.1002/joc.1377.
4. Ceppi P. Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008 / P. Ceppi, S.C. Scherrer, A.M. Fischer et al. // *Int. J. Climatol.* — 2012. — 32(2). — p. 203–213. — DOI: 10.1002/joc.2260.
5. Tashilova A.A. Analysis of climate change in Terskol over the last 60 years / A.A. Tashilova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* — 840(2021). — p. 012038. — DOI: 10.1088/1755-1315/840/1/012038.
6. Liu X. Elevation dependency of recent and future minimum surface air temperature trends in the Tibetan Plateau and its surroundings / X. Liu, Z. Cheng, L. Yan et al. // *Glob. Planet. Change.* — 2009. — 68(3). — p. 164–174. — DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.03.017.
7. Xu Y. Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols / Y. Xu, V. Ramanathan, W.M. Washington // *Atmos. Chem. Phys.* — 2016. — 16(3). — p. 1303–1315. — DOI: 10.5194/acp-16-1303-2016.
8. Bekkiev M.Yu. Sovremennaya degradaciya dolinnyh lednikov Central'nogo Kavkaza [Modern degradation of valley glaciers in the Central Caucasus] / M.Yu. Bekkiev, M.D. Dokukin, R.Kh. Kalov et al. // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and applied climatology]. — 2021. — Vol. 8. — 3. — p. 113-141. — DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141 [in Russian]
9. Kutuzov S. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 / S. Kutuzov, I. Lavrentiev, A. Smirnov et al. // *Front. Earth Sci.* — 2019. — 7. — p. 153. — DOI: 10.3389/feart.2019.00153.
10. Huss M. A new model for global glacier change and sea-level rise / M. Huss, R. Hock // *Front. Earth Sci.* — 2015. — 3. — p. 54. — DOI: 10.3389/feart.2015.00054.
11. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshchee rezyume [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary]. — St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. — 124 p. [in Russian]