

---

## Изучение динамики площади ледников в горах Северного Кавказа помощью аэрокосмических технологий

*А. Г. Положенцев, Э. А. Иноземцева*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Работа посвящена ледникам Северного Кавказа. Анализируются факторы, влияющие на динамику площади ледников, а также рассмотрены принципы организации наблюдений за колебаниями ледников. Уровень современного развития сферы дистанционного зондирования предоставляет отличную возможность для подробного и точного изучения динамических характеристик поверхностного слоя льда на ледниках на основе картографических анимаций ряда снимков. Работа основана на данных космического мониторинга с помощью аппарата Метеор-М №2.

**Ключевые слова:** ледник, динамика, абляция, деградация ледников, Северный Кавказ, аэрокосмические технологии, мониторинг.

### Введение

За последние десять лет основной темой для изучения и дискуссии в научной среде стало глобальное потепление. На данный момент, известно, что мы находимся в теплый период ледниковой эпохи внутри четвертичного периода [1], начало которого приурочено к середине XIX века. Наряду с этим, весомой ценностью обладают наблюдения за изменениями движения ледников, другими словами – изменениями их формы, размеров, которые в свою очередь вызваны изнутри трансформацией режима и климата.

Северный Кавказ – это высокогорная часть земного шара. Здесь расположены несколько вершин гор, выше пяти тысячи метров. На их склонах насчитывается около 300 ледников. Самая высокая точка - гора Эльбрус, составляющая 5642 метра над уровнем моря. Только на склонах Эльбруса насчитывается около 200 ледников суммарной площадью свыше 100 км<sup>2</sup>. Всего же на Кавказе около 2000 ледников суммарной площадью 1400 км<sup>2</sup>.

В представленной работе проанализирована тенденция площади ледников гор Северного Кавказа на основе аэрокосмических снимков по данным космического аппарата Метеор – М № 2-2 за период с 28 апреля 2022 по 23 июля 2022 года.

Для совершения намеченных целей имеют место такие задачи, как: определение методики наблюдения за динамикой ледников, изучение изменения климата горной местности Северного Кавказа, исследование современного состояния и динамики ледников Северного Кавказа.

### **Объекты и методы исследования**

Ледники – это неустойчивый, динамичный и непостоянный природный феномен. От интенсивности варьирования климата ледник способен изменяться в размерах; в непрерывном процессе перемен находится и лёд в ледниках из верхней части питания, откуда идёт аккумуляция снега и происходит льдообразование, его интенсивность и ход разные, это приводит к разному строению фирново-ледяной толщи и неодинаковой скорости превращения фирна в лёд.

Интенсивность ритма льда в ледниках на разных его частях различается, это зависит от многих причин: рельефа, толщи льда, температуры, наклона поверхности ледника, размера, а также изменения во времени – зимой и летом. Узловой фактор, который имеет прямое воздействие на движение ледников, его увеличение или убывание в размерах, представляет собой отношение между поступлением льда из области питания в область расхода - абляции. От скорости движения напрямую зависит поступление льда, оно, как правило не столь значимо, и поддается изменениям в течение многих лет.

Колебания ледников тоже зависят от условий абляции, другими словами, таяния льда.

Условия абляции на разной величине различны. На северных и западных склонах льда тает меньше, чем на южных и восточных. Из этого следует, что ледники Эльбруса, расположенные на северных и западных склонах на сегодняшний день стационарны, или, иными словами, наступают, когда южные и восточные склоны, напротив, интенсивно отступают.

После анализа данных площади оледенения Большого Кавказа за период 12-ти

лет, с 2010-2022 год, стало известно, что площадь оледенения данного участка изучения сократилась на 23% с отклонением в  $\pm 4\%$ , с 1382 с отклонением в  $\pm 58\%$  до  $1061 \pm 34 \text{ км}^2$ . Интенсивность таяния ледников Большого Кавказа по сравнению с 1911 – 1960 годами, и XXI веком изменилась, увеличившись в четыре раза.

Особенно значимым и содержательным показателем движений ледников является трансформация их массы или объема. В статье приведены результаты изучения динамики ледников гор Северного Кавказа, по ряду космических снимков, сделанных космическим аппаратом Метеор-М №2, в период с 28 апреля по 23 июля 2022 года, собранных в сборнике С.В. Калесника «Очерки гляциологии», 1963 г. [2].

Скорости движения льда на поверхности замерялись на 3 точках - основных ледниках Кавказа: ледник Безенги, Цейский ледник, ледник Караугом.

Средняя скорость отступления или наступания ледника рассчитывалась по относительному изменению площади выводной части ледника за исследуемый период (измерялась в  $\text{км}^2/\text{год}$ ). Район исследования показан на рис. 1, данные по площади и скорости изменения площади ледников приведены в таблице №1.

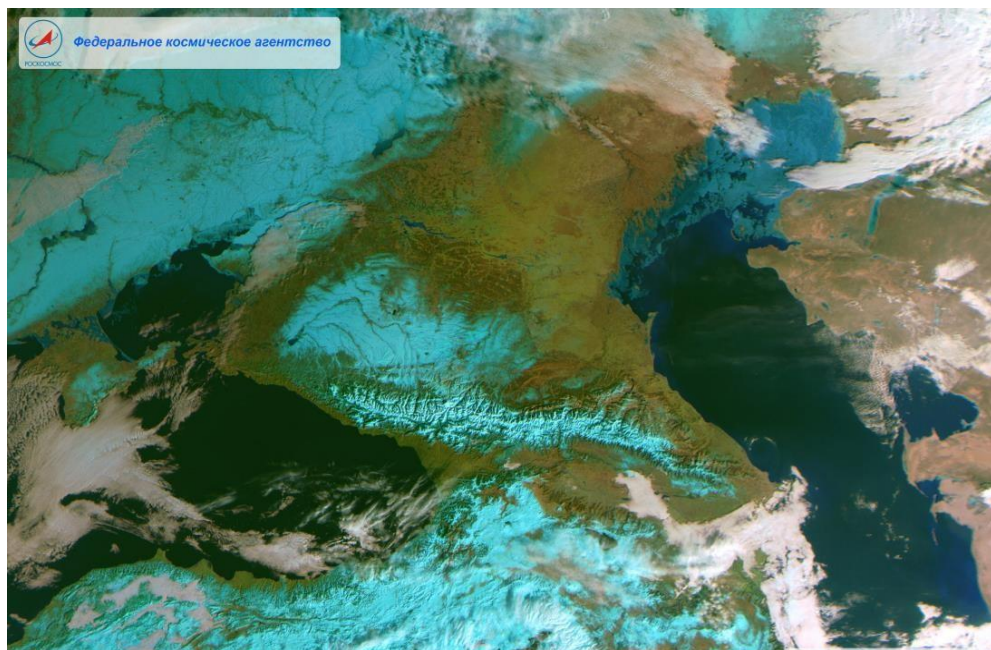


Рис. 1.- Космосъемка Северного Кавказа аппаратом Метеор-М. [3].

Таблица № 1. Динамика ледников Северного Кавказа в период с 28.04.2022г. по 28.07.2022г. [4].

Наименование ледника	Динамика деградации ледника, м/сутки (28.04.2022-28.05.2022)	Динамика деградации ледника, м/сутки (28.05.2022-28.06.2022)	Динамика деградации ледника, м/сутки (28.06.2022-28.07.2022)
Ледник Безенги	0,41	0,48	0,52
Ледник Цейский	0,35	0,43	0,58
Ледник Карагуом	1,11	1,26	1,32

Исходя из изученных исследований Института географии РАН, несложно понять, что происходит увеличение температуры воздуха летом, а также увеличение солнечной радиации, вследствие изменения циркуляции и наибольшего распространения антициклонов летом на фоне неизменяемого количества осадков [4].

Скорость движения льда определена на повторе съёмок с помощью аппарата Метеор-М №2 (рис. 2,3). Для сопоставления показателей динамики ледников использовались опубликованные работы – «Справочник потребителя спутниковой информации» 2005, «Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации» 2005 [5,6].

### Описание результатов

Проведенные в период с 28 апреля по 28 июля 2022 года измерения показали, что к группе быстро отступающих можно отнести ледник Карагуом. В результате проведенных исследований установлена динамика деградации ледника: ледник отличается большими скоростями, которые достигают 1,32 м/сутки. Средняя скорость составила 1,23 м/сутки [7].

На леднике Безенги была замерена скорость движения вытянутого

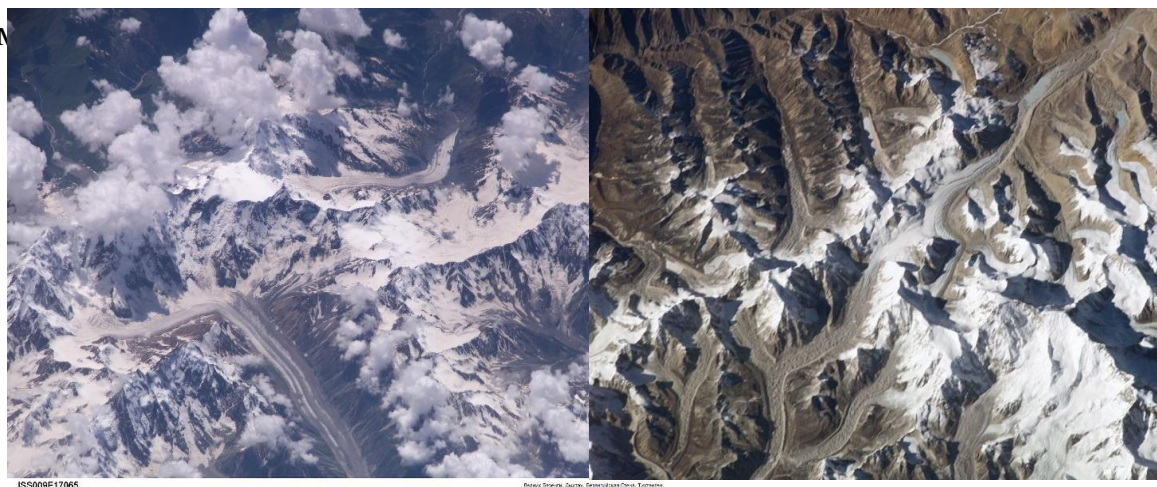


Рис. 2. - Язык ледника Караугом. Динамика за период с апреля по июль 2022 года [9].

Здесь подтвердился факт замедления льда по направлению к концу ледника. Наибольшая скорость составила 0,52 м/сутки. Длина мореного вала составляет 685 метров, из чего следует, что коэффициент замедления на этом отрезке равен 0,41 см/год на каждый метр поверхности [9].



Рис. 3. - Ледник Безенги. Динамика за период с апреля по июль 2022 года [5].

Один из самых крупных ледников всего Северного Кавказа – Цейский

ледник (рис.4). В нём сконцентрированы большие массы снега и льда, которые покрывают горную снежную вершину северного склона массива Адай-Хох, высотой 4408 метров. Вершина Цейского ледника расположена на высоте 2200 метров. Площадь ледяного покрова составляет примерно 10 км<sup>2</sup>. Длина ледяного «языка» достигает 9 км. Толщина покрова колеблется от 20 до 80 метров [9]. Тем не менее, на леднике была замерена скорость движения льда в центральных и боковых зонах и подтверждена разница «от центра к бортам». В центре наблюдается скорость 0,58 м/сутки, а у борта - 0,49 м/сутки. То есть, можно смело утверждать, что скорость движения ледяных масс в центре выше, чем на окраинах.

По данным оперативного мониторинга климата, проводимого в ГМЦ России, средняя температура летом в горах Северного Кавказа составляет от + 8° до + 15°С., а в зимние месяцы она опускается до - 20°С.

Данные, полученные из станции на территории гор Северного Кавказа, охватывают в среднем 40 – 50 лет, исходя из этого, можно сделать вывод об уменьшении площади оледенения Северного Кавказа. Правда, для выявления тенденции к постоянному увеличению или уменьшению ледяного покрова в данном регионе, этих данных не достаточно.

Поэтому, если говорить про краткосрочный период оледенения, то, например, доктор географических наук В.Д. Панов, который изучал изменения климата Северного Кавказа с 1881 по 1990 год, пришел к выводу, что за период с 1931 по 1940 год происходит увеличение летних температур, а, соответственно, и уменьшение площади ледяного покрова.

В.Д. Панов заметил, что, несмотря на значительный период односильного потепления температуры воздуха за 9 лет, в целом, за весь

---

остальной период наблюдения складывались благоприятные погодные условия для увеличения площади ледников на Кавказе. Особенно ярко этот период наблюдается с 1900 по 1911 год.

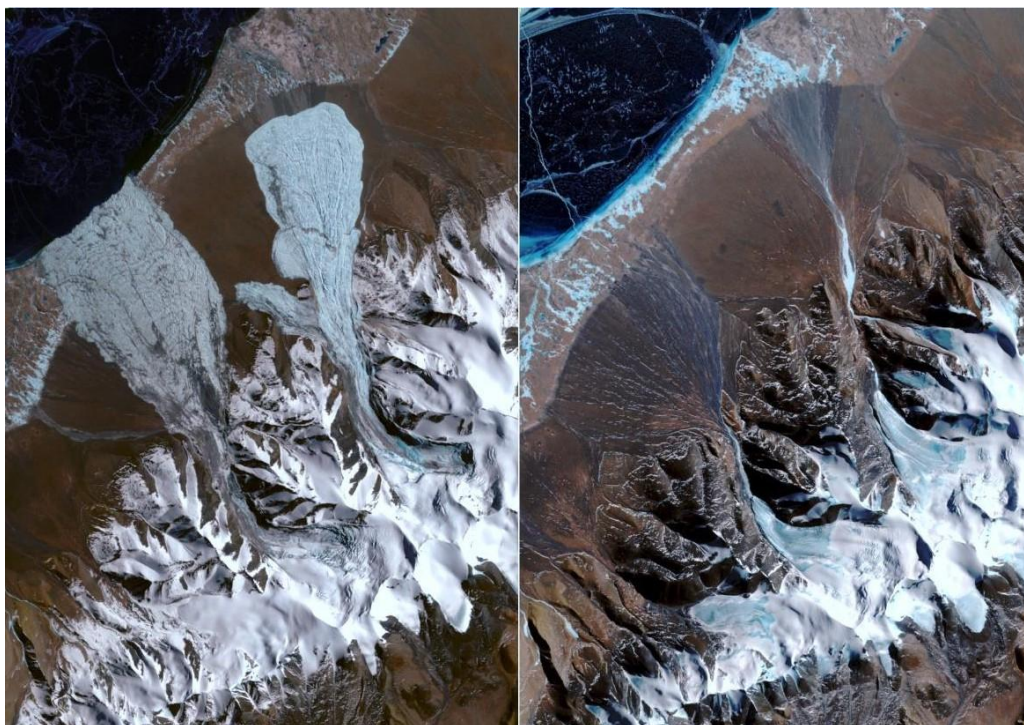


Рис.4. - Аэрокосмический снимок части Цейского ледника за период с апреля по июль 2022 года [10].

Если проанализировать кривую изменения глобальной среднегодовой температуры, приведенной на рисунке 5, то можно увидеть, что, несмотря на небольшие периоды уменьшения температуры в 1880 – х годах и 1960 – х годах, в целом можно наблюдать устойчивую динамику повышения температуры воздуха.

Большой вклад в изучение ледников внесли В.Д. Панов и П.М. Лурье. По данным ученых, площадь ледников северного склона Главного Кавказского хребта сократилась с 1614 км<sup>2</sup> в 1895 году до 765 км<sup>2</sup> в 2011 году, т. е. на 849 км<sup>2</sup>, или на 52,6%. Площадь оледенения в этот период сокращалась неравномерно, наиболее интенсивно в 1895–1970 годах (по

8,5 км<sup>2</sup> в год) и в 2000–2011 годах (по 8,1 км<sup>2</sup>/год). Наименьшая величина сокращения площади отмечена в 1970–2000 годах – по 4,1 км<sup>2</sup>/год.

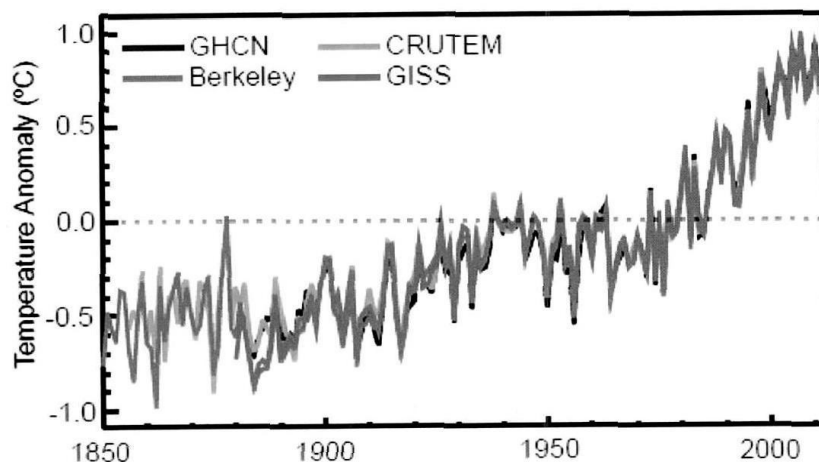


Рис. 5. – Динамика глобальной среднегодовой температуры воздуха у поверхности земли по отношению к 1961-1990 годам (по данным баз данных Berkeley, CRUTEM, GHCN и GISS) (AR5, 2013) [11].

Но, по сравнению с каталогом ледников исследователя Подозерского К.И., процент ледников на северном склоне за 1895–2000 годы увеличился на 15% (Панов, 1993; Лурье, Панов, 2011). Это произошло в результате отделения притоков от крупных сложно-долинных ледников, а также распада ранее единых ледников на несколько частей.





Рис. 6.- Выделенная граница ледника Караугом [12].

Именно по этой причине повышения температуры воздуха без ярко выраженных похолоданий в летний период и потеплений в зимний, можно увидеть сезонное уменьшение и увеличение площади ледников. На основе созданной анимации есть возможность очень точно выявлять границу ледника даже при наличии мореного чехла на поверхности, блокирующего идентификацию, как по спутниковым снимкам, так и при работе в поле. Но стоит уточнить, что за ледник принимается только лед, который имеет свойство движения, тогда как при рассмотрении ледника с гидрологической точки зрения следует учесть также фирново-ледяную облицовку и мертвый лед, т.к. он вносит свою долю в сток данного ледника.

Как следствие, станет видно, какую разницу составляет скорость перемещения слоя льда от центра к бортам и от языка к ледопаду (рис.6). Несмотря на то, что скорость движения льда у окраин более низкая, чем в центральных областях, она всё равно присутствует, поэтому ученым не составляет труда определить границы ледника, даже несмотря на присутствие мореного чехла различной толщины.

### **Выводы**

Для сопоставления показателей динамики ледников использовались опубликованные результаты исследований за 2021–2022 годы, а также работы Zeeberg & Forman и Blarambergs [13,14].

Благодаря аэрокосмическим методам исследования, решаются многие задачи, связанные с динамикой природных объектов. Кроме того, с их помощью изучается эволюция и динамика ледников.

Архив коммерческих спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения начал накапливаться только в последние несколько лет, что

---

благоприятно сказалось на возможности изучения изменения площади ледников не только на Северном Кавказе, но и по всей планете. Разумеется, единственным недостатком остается слишком короткий временной промежуток, не позволяющий заглянуть, например на 100 или 200 лет назад, а только охватывающий последние 10 – 15 лет для изучения динамики ледяного покрова.

Благодаря созданию анимации из серии космических снимков, появляется возможность решить одну из основных проблем гляциологии: ~~наблюдение~~ изменение контура ледника.

Исследования П.М. Лурье и В.Д. Панова четко сопоставляются с проведенным анализом динамики ледников в период с 28 апреля по 28 июля 2022 года и подтверждают, что происходит ускорение процесса деградации ледникового покрова с увеличением летней температуры и приходящей солнечной радиации, а также изменением альбедо.

### Литература

1. Санюшкин А. И., Зимин М.А. Спутники SPOT 6 и SPOT 7 – новый шаг в развитии отрасли ДДЗЗ // Земля из Космоса. – 2014. – № 2. – С. 74–84.
2. Калесник, С. В. Очерки гляциологии. – Москва: Географгиз, 1963. – 553 с.
3. Мальбахов А.В. Динамика горного оледенения Центрального Кавказа и формирование опасных природных явлений в условиях изменения климата. – Москва: Наука о Земле, 2013. – С.178-185.
4. Ендржеевский А.И. По современным и древним ледникам Дигории // Ежегодник Русского горного общества, IV, 1904. Москва, 1906. С. 95–149 с.
5. Асмус В.В. и Милехин О.Е. Справочник

потребителя спутниковой информации. // 2005. С-Петербург, Гидрометеоиздат, 114 с.

6. Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребаев В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации. / Сб. «Труды НИЦ «Планета», вып.1(46), 2005. – с. 3-21.

7. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Рототаева О.В., Шахгеданова М.В. Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001 – 2010 гг. на изменения температуры и количества осадков // Лед и Снег. 2013. – с. 26–33.

8. Коваленко Н.В. Неразрывность генетической цепи снежник-ледник // Москва: Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2011. – с. 9-14.

9. Котляков В.М., Рототаева О.В., Осокин Н.И. Пульсирующие ледники и ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Владикавказ: Вестник Владикавказского научного центра, 2004. – с.42-48.

10. Тавасиев Р.А., Галушкин И.В. Опасные природные процессы в Цейском ущелье и их влияние на рекреационный комплекс // Владикавказ: Вестник Владикавказского научного центра, 2007. – 29 с.

11. Лурье П.М., Панов В.Д. Изменение современного оледенения северного склона Большого Кавказа в XX в. и прогноз его деградации в XXIв. // Москва: Метеорология и гидрология, 2014. – с.68-76.

12. Тавасиев Р.А. Деградация ледника Караугом. Часть 1. Динамика отступления ледника // Владикавказ: Вестник Владикавказского научного центра, 2017. – с.15-21.

13. Zeeberg J., Forman S. Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era. *The Holocene* 2022. N11, pp. 161–175.

14. Blaramberg I. Historical, topographical, ethnographic, and military description of the Caucasus. Pallas, 241 p. // *LEGOS*, 2022.

### References

1. Sanyushkin A. I. *Zemlya iz Kosmosa*. 2014. № 2. pp. 74–84.
2. Kalesnik, S. V. *Moskva: Ocherki glyaciologii [Essays on glaciology]* Geografiz, 1963. 553 p.
3. Mal`baxov A.V. *Moskva: Nauka o Zemle [Earth Science]*, 2013. Pp.178-185.
4. Endrzheevskij A.I. *Ezhegodnik Russkogo gornogo obshhestva, IV*, 1904. Moskva, 1906. Pp. 95-149.
5. Asmus V.V. i Milexin O.E. 2005. *Spravochnik potrebitelya sputnikovoj informacii [Directory of the consumer of satellite information]*. S-Peterburg, Gidrometeoizdat, 114 p.
6. Asmus V.V., Dyadyuchenko V.N., Zagrebaev V.A., Makridenko L.A., Milexin O.E., Solov`ev V.I. V sb. *Trudy` NICz «Planeta»*, vy`p.1(46), 2005. Pp. 3-21.
7. Nosenko G.A., Xromova T.E., Rototaeva O.V., Shax-gedanova M.V. *Led i Sneg*. 2013. Pp.26–33.
8. Kovalenko N.V. *Moskva: Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2011. Pp. 9-14.
9. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Osokin N.I. *Vladikavkaz: Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo centra*, 2004. Pp. 42-48.
10. Tavasiev R.A., Galushkin I.V. *Vladikavkaz: Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo centra*, 2007. 29 p.
11. Lur`e P.M., Panov V.D. *Moskva: Meteorologiya i gidrologiya*, 2014.



Рр.68-76.

12. Tavasiev R.A. Vladikavkaz: Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo centra, 2017. Рр.15-21.

13. Zeeberg J., Forman S. The Holocene 2022. N11, pp. 161–175.

14. Blaramberg I. Pallas, 241 p.; LEGOS, 2022.