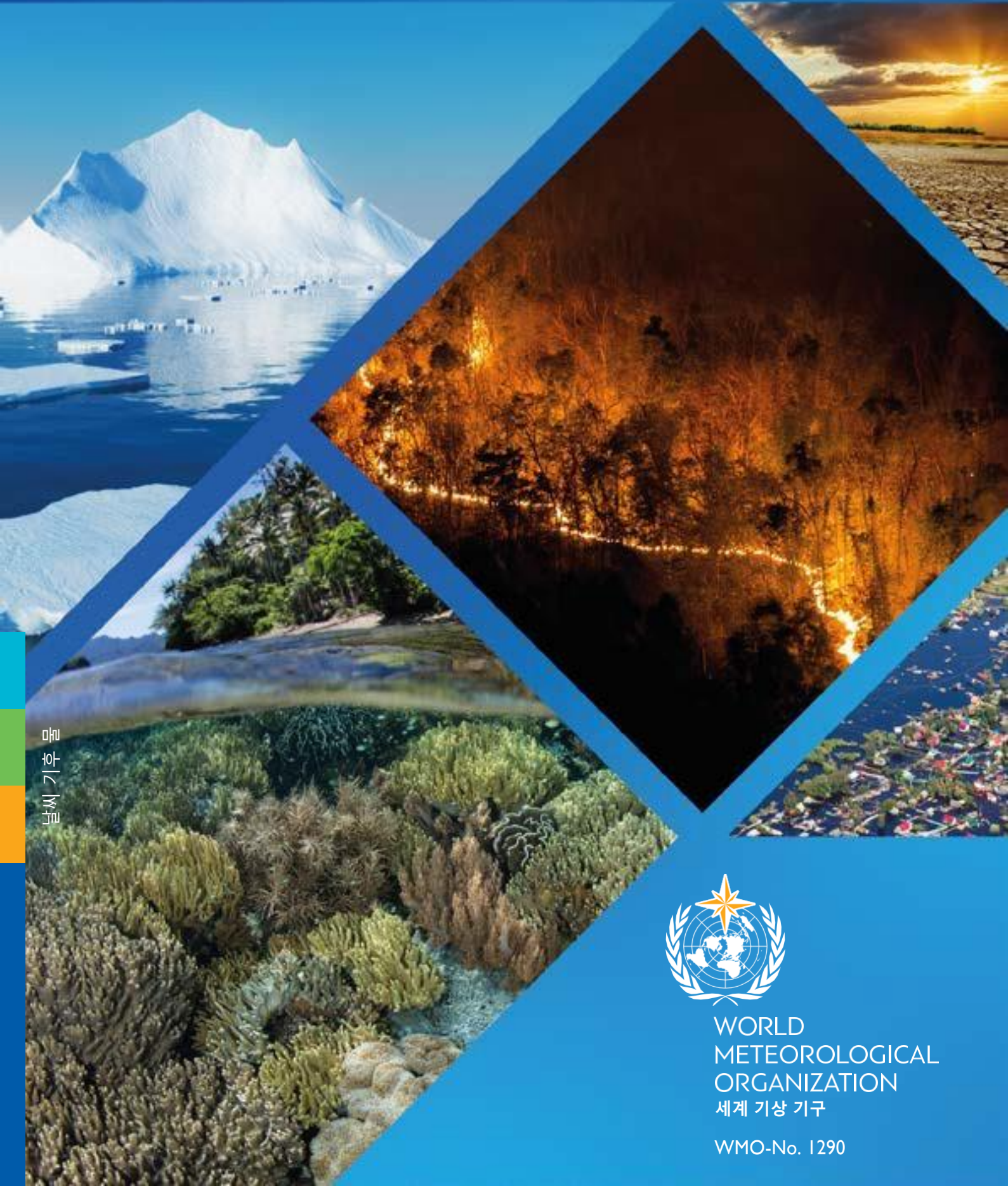


2021년 전지구기후현황



남씨 기후
문



WORLD
METEOROLOGICAL
ORGANIZATION
세계 기상 기구

WMO-No. 1290

WMO-No. 1290

© 세계기상기구, 2022

인쇄, 전자 및 기타 형식과 모든 언어로 출판할 수 있는 권리는 WMO가 보유한다. WMO 출판물의 짧은 발췌문은 전체 출처가 명확하게 표시되는 경우 승인 없이 복제될 수 있다. 이 출판물의 일부 또는 전체를 출판, 복제 또는 번역하기 위한 편집서신 및 요청은 다음의 주소로 보내야 한다.

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

전화번호: +41 (0) 22 730 84 03
팩스: +41 (0) 22 730 81 17
이메일: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-11290-3

Adobe Stock 의 표지 삽화: 빙산(사진 출처: z576), 건기의 밤에 발생한 산불, 붉은 색과 주황색 산불 (사진 출처: prirach), Raja Ampat 의 얇은 산호초와 섬(사진 출처: ead72), 그레이트 리버의 저지대 침수 지형(사진 출처: Vladimir Mel-nikov). iSTOCK: Terre de sécheresse au coucher du soleil. Ciel dramatique de désert. changement climatique (사진 출처: mycola).

참고

WMO 출판물에 사용된 명칭과 이 출판물의 자료 제시는 국가, 영토, 도시 또는 지역 또는 지역 당국의 법적 지위 또는 국경 또는 분계선의 한계에 관한 WMO 측의 의견 표현을 의미하지 않는다.


특정 회사 또는 제품에 대한 언급은 본문에서 언급되지 않았거나 광고되지 않은 다른 유사한 성격의 회사 또는 제품보다 우선하여 WMO에서 승인하거나 추천한다는 의미는 아니다.


저자의 이름이 적혀 있는 WMO 출판물에 나타난 결과, 해석 및 결론은 저자의 단독 소유이며 WMO 또는 WMO 회원의 해석 및 결론을 반드시 반영하지는 않는다.


목차


주요 메시지.....	2
서문.....	3
전지구 기후 지표.....	4
베이스라인	4
온실 가스.....	4
온도.....	6
해양.....	7
빙하권	12
성층권 오존	19
단기 변동성의 동인	20
2021년의 위험 기상 현상	24
폭염과 산불	24
한파와 눈	25
강수.....	26
홍수	27
가뭄.....	28
열대 사이클론.....	29
강한 폭풍.....	31
원인규명.....	31
위험 및 영향.....	33
식량 안보.....	33
인도주의적인 영향과 인구 이동	35
기후가 생태계에 미치는 영향	38
<i>북반구 여름 기상이변: 준정상 행성파의</i> <i>역할과 북극 온난화의 증폭.....</i>	<i>40</i>
<i>기후 모니터링을 위한 관측 근거.....</i>	<i>44</i>
<i>계절내-계절 예측이 동남아시아 지역의 재난 위험 대비를</i> <i>향상시킬 수 있는가? 2021 년 9 월 20-26 일 사례 연구 검토.....</i>	<i>46</i>
데이터 세트 및 방법	47
기고자 목록	53


주요 메시지


 2021년의 지구의 평균 기온은 1850-1900년 산업화 이전의 평균보다 약 1.11 ± 0.13 °C 더 높았다. 연초와 연말에 발생한 라니냐 현상의 영향으로 인해 최근 몇 년보다 덜 더웠다. 최근 7년 동안 즉, 2015년-2021년은 기록상 가장 따뜻한 7년이었다.


 전 세계 평균 해수면은 2013년-2021년의 기간 동안 연간 평균 4.5mm 상승하여 2021년에 최고 기록에 도달했다.


 2021년에 남극 오존 구멍의 최대 면적은 2480만 km²에 달했다. 이러한 비정상적으로 깊고 큰 오존 구멍은 하부 성층권의 강력하고 안정적인 극소용돌이와 평균보다 낮은 기온에 의해 유발되었다.


 그린란드에서는 고도 3,216m의 그린란드 빙상에서 가장 높은 지점인 서밋 스테이션(Summit Station)에서 이례적으로 8월 중순 해빙 현상과 사상 최초의 강우가 발생했다.


 이례적인 폭염은 북아메리카 서부와 지중해 전역에서 기록을 경신했다. 캘리포니아 주의 데스밸리 기온은 7월 9일 54.4 °C에 도달하였고, 이는 2020년의 기온과 비슷한 수준으로 적어도 1930년대 이후 세계에서 가장 높은 기온이었고 시칠리아의 시라쿠사의 기온은 48.8°C에 도달했다.

 허리케인 이다(Ida)는 북대서양 허리케인 시즌에서 가장 강력한 현상으로, 8월 29일 루이지애나주에 상륙하였고, 이는 750억 달러의 경제적 손실을 초래한 기록적인 상륙이었다.

 치명적이고 큰 희생을 초래하는 홍수가 발생하여 중국 허난성에서 177억 달러의 경제적 손실이 발생했으며, 서유럽에서는 7월 중순에 기록상 가장 심각한 홍수가 발생했다. 이 기상 현상은 독일에서 200억 달러가 넘는 경제적 손실을 야기했다.

 가뭄은 캐나다, 미국, 이란, 아프가니스탄, 파키스탄, 터키, 투르크메니스탄 등 세계 여러 지역에 영향을 미쳤다. 캐나다에서는 심각한 가뭄으로 인해 밀과 캐놀라 작물 생산량이 2020년보다 35%-40% 낮을 것으로 예상되며, 미국에서는 콜로라도 강의 미드 호 수위가 7월 만수위보다 47m 아래로 떨어졌으며, 이는 기록상 가장 낮은 수위였다.

 COVID-19 팬데믹으로 더욱 악화된 분쟁, 이상기후 현상 및 경제적 충격의 복합적인 영향은 전 세계적으로 식량 안보를 개선하기 위한 수십 년의 진전을 약화시켰다.

 수문기상 위험은 계속해서 국내 실향의 원인이 되었다. 2021년 10월 기준으로 가장 많은 이동 횟수가 기록된 국가는 중국(140만 이상), 베트남(664,000 이상), 필리핀(600,000 이상)이었다.

서문



이는 COVID-19 팬데믹과 관련된 제한으로 인해 2020년에 화석 연료 CO₂ 배출량이 약 5.6% 감소했음에도 불구하고 사실입니다.

21세기 말까지 산업화 이전(1850-1900년) 수준보다 1.5 °C - 2 °C 높은 세계 평균 온도를 안정시키려면 온실 가스 배출을 대규모 감소시켜야 하고, 향후 10년간 더 강화되어야 합니다.

조기 경보 시스템은 기후 적응을 위해 전반적인 부문에 걸쳐 매우 필요합니다. 하지만 절반 미만의 회원국만 조기 경보 시스템을 갖추고 있다고 보고되었습니다. WMO와 그 회원국은 가까운 장래에 이러한 상황을 실질적으로 개선하기 위해 긴밀히 협력하고 있습니다.

세계기상기구(WMO) 2021 전지구기후현황 보고서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 6차 평가 보고서인 실무그룹 I, II 및 III의 보고서가 발표된 지 몇 달 후에 간행되었습니다. 현재의 WMO 보고서는 2021년에 관측된 연간 기후 상태에 대한 업데이트를 제공하고 주요 지표 측면에서 지속되는 추세(IPCC 보고서에서도 보고됨)를 보여줍니다. 이에는 온실 가스의 농도, 세계 연간 평균 표면 온도, 세계 평균 해수면, 해양 열 함량, 해양 산성화, 해빙 면적 그리고 빙상과 빙하의 질량 변화가 포함됩니다. 주요 지표는 기후가 계속 변화하고 있음을 나타내고, 사회경제적 영향에 대한 정보는 현재의 날씨 및 기후 현상에 대한 인구의 취약성을 강조하여 설명합니다. 위험 기상 및 기후가 식량안보와 인도주의적 요소에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라 1000억 달러 이상의 손실과 피해를 입혔다고 보도되었습니다.

저는 이 기회를 빌어 물리적 데이터 분석 및 영향 평가를 사용하여 이 보고서를 작성한 전문가와 주 저자에게 축하의 말을 전합니다. 저는 모든 기고자, 특히 WMO 회원국 국립 기상수문청, 지역 기후 센터 및 유엔 기관의 협력과 의견에 감사드립니다. 이 보고서는 우리 조직이 지구 시스템의 상태, 2021년의 기상 및 기후 조건 그리고 영향에 대한 최신 정보를 세계의 지도자와 시민들을 위해 업데이트하는데 도움이 되고자 합니다. WMO는 이 출판물을 지원하고 이러한 목적을 위해 널리 알리기 위해 최선을 다하고 있습니다.

2019년부터 2020년까지 대기 중 CO₂ 농도의 증가는 2018년부터 2019년까지 관측된 것보다 약간 낮았지만, 지난 10년 동안의 평균 연간 성장률보다는 높았습니다.

(Prof. Petteri Taalas)
사무총장

전지구 기후 지표

전지구 기후 지표¹는 대기의 구성성분, 에너지 변화, 육지, 바다, 얼음의 반응을 비롯하여 전지구적 규모의 기후 변화에 대한 폭넓은 견해를 제공한다. 이러한 지표들은 서로 밀접하게 연관되어 있다. 예를 들어, 대기 중 CO₂와 기타 온실 가스의 증가는 에너지의 불균형으로 이어져 대기와 해양을 온난화시킨다. 해양의 온난화는 차례로 해수면 상승으로 이어지고, 대기 온도가 상승하여 육지의 얼음이 녹으면서 해수면을 상승시킨다. 세계 지표는 광범위하고 여러 관측 시스템에 기초한 광범위한 데이터 세트(보고서 끝에 나열)에서 추출되었다(기후 모니터링을 위한 관측 근거 참조). 이들 지표들은 지구 시스템의 모든 부분에 영향을 미치는 온난화 세계의 일관성 있는 그림을 형성한다.

세계 기후 지표와 지속 가능한 개발 목표 간의 연결은 [기후 지표와 지속 가능한 개발: 상호 연결](#)

https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21953&lang=en (WMO-No. 1271)에서 강조되었다. 이 보고서는 물리적 시스템으로서의 주요 기후 지표와 17개의 지속 가능한 개발 목표 대부분에 대한 연쇄적 위험 간의 링크 및 피드백 루프를 추적한다. 따라서 관련 위험 및 영향뿐만 아니라 세계 기후 지표를 모니터링하는 것은 2030년까지 지속 가능한 개발 목표를 달성하는데 매우 중요하다.

베이스라인

베이스라인은 일반적으로 10년 이상의 특정 기간으로, 현재 조건을 비교할 수 있는 고정된 기간으로 사용된다. 이 보고서에는

다양한 베이스라인이 사용되었으며 해당되는 경우 텍스트와 그림에 명시되어 있다.

가능한 경우 WMO 기후 표준 평년치(1981–2010)가 일관된 보고를 위한 베이스라인으로 사용된다.² 하지만 일부 지표의 경우 전체 기간 동안 측정의 부족으로 인해 또는 대표적인 통계치를 계산하는데 더 긴 기간이 필요하기 때문에 이 베이스라인을 사용할 수 없다.

다음과 같은 두 가지 주목할만한 예외가 존재한다. 첫째, 지구 평균 기온의 경우 1850–1900년의 베이스라인이 사용된다. 이는 산업화 이전 온도에 대한 참조 기간으로 최근의 IPCC 보고서(제6차 평가 보고서,³ 특별 보고서: 1.5°C⁴ 온도의 지구 온난화)에 사용된 베이스라인으로, 파리 기후 협정의 목표와 관련된 진행상황을 이해하는 것과 관련이 있다. 둘째, 온실 가스의 경우 대기 농도는 빙하 코어에 갇힌 기포를 사용하여 훨씬 더 과거로 거슬러 올라가 추정될 수 있다. 따라서 이 보고서에서는 산업화 이전의 온실 가스 농도를 나타내기 위해 1750년 베이스라인이 사용되었다.

온실 가스

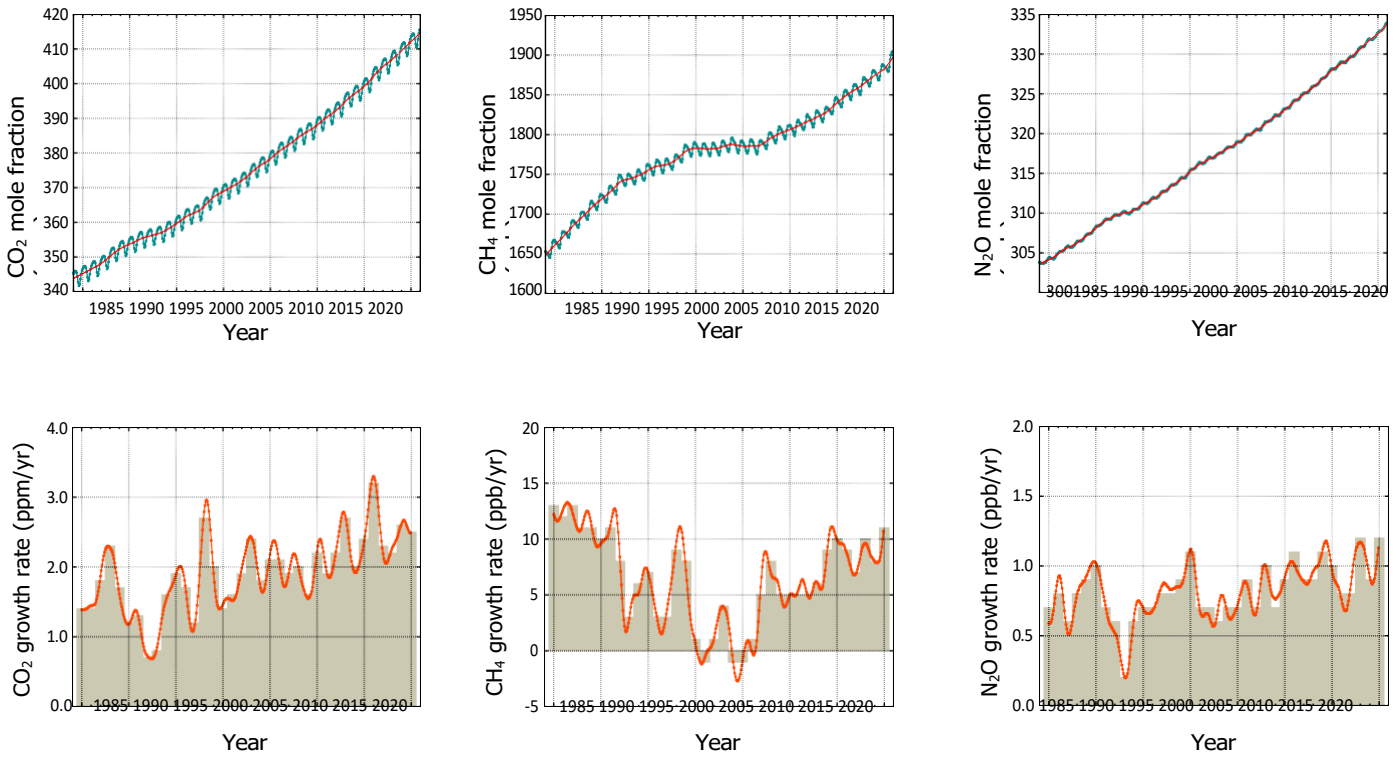
온실 가스의 대기 농도에는 인간의 활동, 천연자원, 생물권 및 해양 흡수원의 배출 간의 균형이 반영된다. 인간의 활동으로 인한 대기 중 온실 가스 수준의 증가는 20세기 중반 이후 기후 변화의 주요 동인이었다. 온실 가스의 지구 평균 물질량은 WMO와 파트너 네트워크의 지구 대기 감시(GAW: Global Atmosphere Watch) 프로그램의 여러 현장에서 수행된 관측으로부터 계산된다.

¹ Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring, *Bulletin of the American Meteorological Society* 2021, 102 (1), E20–E37. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/1/BAMS-D-19-0196.1.xml>.

² 1981–2010 is used in preference to 1991–2020, for consistency with climate reports from WMO Members, not all of whom have yet transitioned to using the more recent period.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018: *IPCC Special Report: Global Warming of 1.5 °C*, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.



2020년에 온실 가스의 몰분율은 각각 산업화 이전(1750년) 수준의 149 %, 262 % 및 123 %인 413.2 ± 0.2 ppm의 이산화탄소(CO₂), 1889 ± 2 ppb의 메탄(CH₄) 그리고 333.2 ± 0.1 ppb의 아산화질소(N₂O)의 전 세계 평균 표면 몰분율과 함께 새로운 최고치를 기록했다(그림 1). 2019년-2020년의 CO₂의 대기 농도 증가는 2018년-2019년 동안 관측된 것보다 약간 낮았지만 지난 10년 동안의 평균 연간 성장률보다 높았다. COVID-19 팬데믹과 관련된 제한으로 인해 2020년에 화석 연료 CO₂ 배출량이 약 5.6% 감소했음에도 CO₂의 대기 농도가 증가하였다.⁵ CH₄와 N₂O의 경우 2019년-2020년 동안의 증가는 2018년-2019년 동안 관측된 것보다 더 높았고 지난 10년 동안의 평균 연간 성장률보다도 더 높았다.

Mauna Loa (하와이)와 Cape Grim (타즈메이니아)를 포함한 특정 위치의 실시간 데이터는 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 수준이 2021년에 계속 증가했음을 나타낸다.

대기 메탄(CH₄)의 증가는 강력한 온실 가스일 뿐만 아니라 인간의 건강, 농업 및 생태계에 영향을 미치는 대류권 오존의 전구체이기 때문에 우려되는 문제이다.⁶ CH₄의 평균 연간 증가는 1980년대 후반에 연간 약 12 ppb에서 1999년-2006년 동안에 거의 0으로 감소했다. 2007년 이후로 대기 CH₄가 증가하고 있고 2020년에는 2019년 수준보다 11 ppb 증가했다. GAW CH₄ 측정을 사용한 연구에 따르면 열대 지방의 습지와 북반구 중위도의 인위적 배출원으로부터 증가된 CH₄의 배출량이 최근 증가의 원인일 가능성이 높다.⁷ 이러한 연구는 또한 CH₄ 배출량 완화의 단기적인 기후 이점과 비용 효율성을 나타내었다. 이러한 완화 조치는 국제연합환경계획(UNEP) 메탄 평가⁸에서 제시되었으며 주요 배출 부문, 즉 석유 및 가스, 농업 및 폐기물 관리를 다룬다.

그림 1. 상단 행: 1984년부터 2020년까지의 CO₂(백만분의 일) (왼쪽), CH₄(십억 분의 일) (중앙), N₂O(십억 분의 일) (오른쪽)의 세계 평균 몰분율(농도 측정치). 빨간색 선은 계절적 변동이 제거된 월별 평균 몰분율이다. 파란색 점과 선은 월 평균을 나타낸다. 하단 행: 연속적인 연간 몰분율 평균의 증가를 나타내는 성장률은 CO₂(ppm) (왼쪽), CH₄(ppm) (중앙) 그리고 N₂O(ppb) (오른쪽)에 해당하는 회색 열에 나타나 있다.

출처: WMO Global Atmosphere Watch.

⁵ https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science; https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21946

⁶ <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

⁷ Nisbet, E. G.; Manning, M. R.; Dlugokencky, E. J. et al. Very Strong Atmospheric Methane Growth in the 4 Years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. *Global Biogeochemical Cycles* 2019, 33 (3), 318–342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.

⁸ <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

온도

2021년의 지구의 평균 기온은 1850-1900년 평균보다 1.11 ± 0.13 °C 더 높았다. 분석에 사용된 6개의 데이터 세트(전지구 온도 데이터 참조)는 2021년을 세계적으로 기록상 5번째-7번째의 가장 따뜻한 해로 규정하고 6개의 데이터 세트 모두 기록상 최근 7년 즉, 2015년-2021년이 가장 따뜻한 해임을 보여준다.

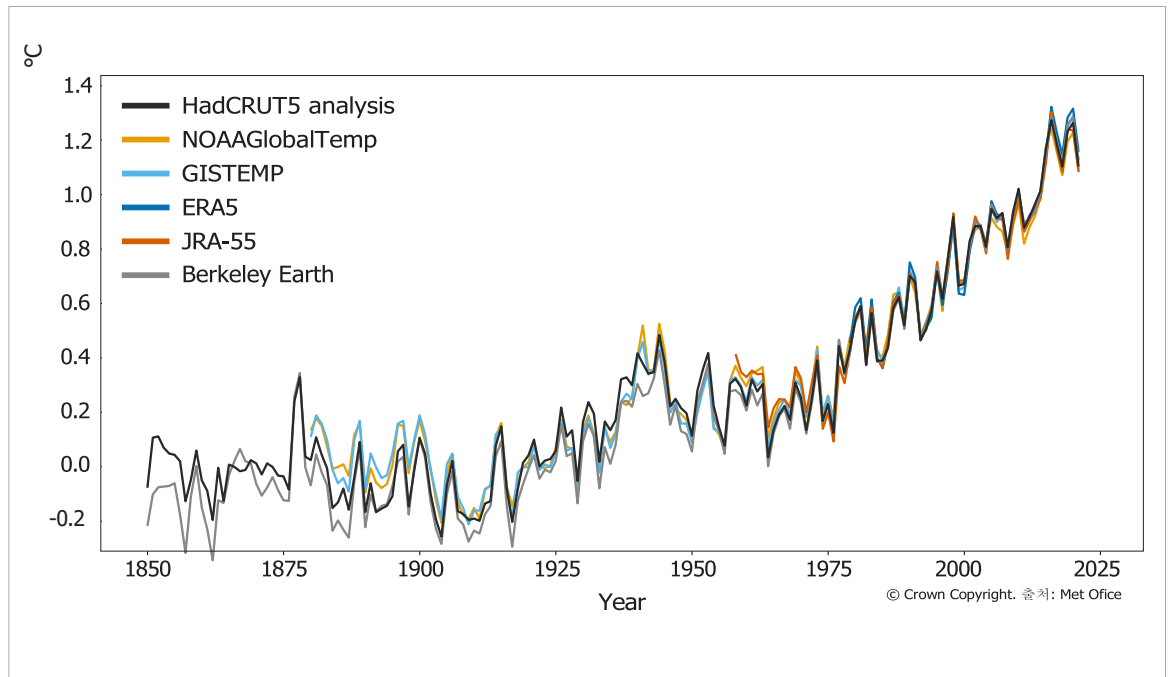
2021년은 "더블딤" 라니냐로 알려진 연초와 연말에 발생한 중간 정도의 라니냐 현상의 영향으로 인해 최근 몇 년보다 덜 따뜻했다(단기 변동성의 동인 참조). 라니냐는 세계 평균 기온에 일시적인 냉각 효과를 미치고, 이 냉각 효과는 기상 현상이 발생한 다음 해에 가장 강력하다. 2018년에 발생한 약한 라니냐를 제외하면 마지막으로 중대한 라니냐 현상은 2011년에 발생했다. 2021년은 2011년보다 약 0.22 °C- 0.29 °C 더 따뜻했다.

강력한 엘니뇨가 발생한 기간에 시작된 2016년은 조사된 대부분의 데이터 세트에서 기록상 가장 따뜻한 해로 남아 있다.

1850-1900년 베이스라인과 관련된 세계 온도 이상을 계산하는 방법은 세계기후상태 보고서의 이전 상태에서 업데이트되었다. 새 방법은 1850-1900년 이후의 변화를 추정하기 위한 기초로서 IPCC 6차 평가 보고서의 온도 변화 및 불확실성의 평가서를 사용한다. 자세한 내용은 전지구 온도 데이터에 관한 섹션에서 주어진다.

IPCC 6차 평가 보고서, 정책 입안자⁹를 위한 요약에서 온도 교차점(장기 온난화가 특정 수준을 초과하는 지점)은 이 교차점을 중심으로 20년 동안의 평균을 사용하여 평가되었다. 2001-2020년 기간 동안 평균은 0.99 [0.84 - 1.10]°C로 추정되었다.¹⁰

그림 2. 6 개의 전지구 온도 데이터 세트(1850 - 2021)에 대한 산업화 이전 조건(1850 - 1900)과의 전지구 연간 평균 온도 차이. 데이터 세트와 처리에 대한 자세한 내용은 데이터 세트와 방법을 참조한다. 출처: Met Office, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.



⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

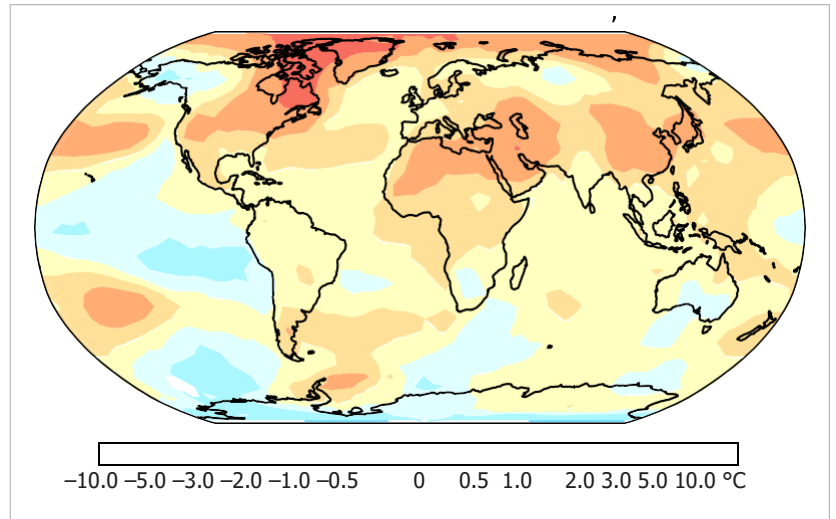
¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers, A.1.2. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. The IPCC average was based on four data sets: HadCRUT5, NOAA GlobalTemp—Interim, Berkeley Earth and Kadow, C.; Hall, D. M.; Ulbrich, U. Artificial Intelligence Reconstructs Missing Climate Information. *Nature Geoscience* 2020, 13 (6), 408-413. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0582-5>. Bracketed values indicate the 5%–95% confidence range.

현재 보고서에 사용된 6개 데이터 세트의 평균에 근거하여 2002-2021년의 잠정적인 20년 평균은 1850-1900년 평균보다 $1.01 \pm 0.12^\circ\text{C}$ 높았다.

2021년의 근접 표면 온도는 북미와 그린란드, 북아프리카와 열대 아프리카, 중동 및 남부 아시아의 넓은 범위에 걸쳐 1981-2010년 평균보다 높았다(그림 3). 기온이 평균 이하인 지역에는 북아시아, 호주, 남아프리카, 북아메리카 북서부의 일부가 포함되었다. 라니냐의 흔적은 열대 태평양에서 명확하게 확인할 수 있다. 남아프리카, 인도, 호주 동부의 더 시원한 날씨가 라니냐의 특징이다. 북부 아시아의 평균보다 더 추운 지역은 이 지역에서 예외적으로 높은 기온을 보인 2020년과 대조를 이룬다. 이는 부분적으로 서로 다른 2020년 초 북극 진동 위상(강 양성)과 2021년 초 북극 진동 위상(강 음성, 북극진동(AO) 섹션 참조)과 관련이 있으며, 이는 1년 내내 평균적으로 영향을 미쳤다.

해양

온실 가스의 증가로 인해 지구 시스템에 축적되는 대부분의 과잉 에너지는 해양에 의해 흡수된다. 해양에 추가된 에너지는 바다를 따뜻하게 하고, 이에 따른 물의 열팽창은 해수면 상승으로 이어지게 되며, 여기에 육지 얼음이 녹은 물이 더해진다. 해양의 표층은 해양의 내부보다 더 빠르게 따뜻해져 지구 평균 해수면 온도가 상승하고 해양 폭염이 발생하였다. 대기의 CO₂ 농도가 증가하면 해양의



CO₂ 농도 또한 증가한다. 이는 해양 화학에 영향을 미치고, 해양 산성화로 알려진 과정인 물의 평균 pH를 낮춘다. 이러한 모든 변화는 해양과 연안 지역에서 광범위한 영향 및 상호 작용¹¹을 갖는다.

해양 열 함유량

인간이 배출하는 CO₂와 기타 온실 가스량의 증가는 대기 상부의 양 복사 불균형(지구 에너지 불균형(EEI))을 유발하여 지구 시스템에 지구 온난화를 주도하는 열 형태의 에너지로 축적된다.^{12,13,14} 지구 시스템에 축적된 열의 약 90%는 해양에 저장되며, 이는 해양 열 함유량(OCC)을 통해 측정된다. 양의 EEI는 지구의 기후 시스템이 현재의 강제력¹⁵에 여전히 반응하고 있으며 강제력이 더 이상 증가하지 않더라도 더 많은 온난화가 발생할 것임을 보여준다.¹⁶

그림 3. 근접 표면 온도의 2021년 및 1981-2010년 평균 온도 차이. 지도에서 보여주는 값은 5개 데이터 세트(HadCRUT5, ERA5, GISTEMP, NOAA GlobalTemp, Berkeley Earth)에서 계산된 중앙값 편차를 보여준다. 출처: Met Office, United Kingdom.

¹¹ Gruber, N.; Boyd, P. W.; Frölicher, T. L. et al. Biogeochemical extremes and compound events in the ocean. *Nature* **2021**, *600*, 395-407. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03981-7>.

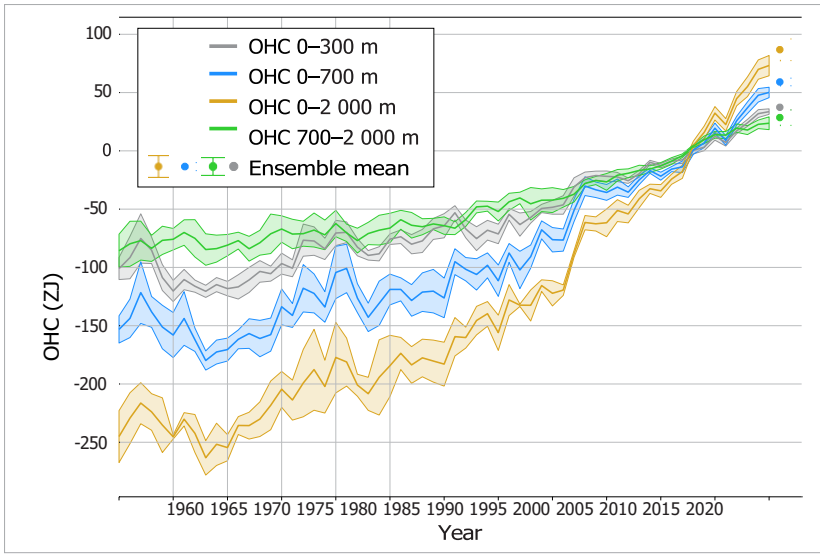
¹² Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P. et al. Earth's energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2011**, *11* (24), 13421-13449. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011>.

¹³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: *Climate change 2013: The physical science basis*, Chapter 3, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

¹⁴ von Schuckmann, K.; Palmer, M. D.; Trenberth, K. E. et al. An imperative to monitor Earth's energy imbalance. *Nature Climate Change* **2016**, *6*, 138-144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>.

¹⁵ Hansen, J.; Nazarenko, L.; Ruedy, R. et al. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science* **2005**, *308* (5727), 1431-1435. <https://doi.org/10.1126/science.1110252>.

¹⁶ Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P. et al. Young people's burden: requirement of negative CO₂ emissions. *Earth System Dynamics* **2017**, *8* (3), 577-616. <https://doi.org/10.5194/esd-8-577-2017>.



이는 곧 해양 열함유량의 지속적인 증가로 나타난다. IPCC는 인간의 영향이 대기, 해양 및 육지를 온난화시켰고, 인간의 영향이 1970년대 이후 관측된 해양 열 증가의 주요 요인이었을 가능성이 매우 높다고 결론을 내렸다.¹⁷

1940년대로부터 시작된 지중 온도 측정은 대부분 선상 측정 시스템에 의존하고 있고, 전지구 규모 및 수심의 측면에서 지중 온도 관측이 제한될 수밖에 없다.¹⁸

그림 4.

0-300m(회색), 0-700m(파란색), 0-2000m(노란색) 및 700-2000m(녹색) 수심에서 2005-2017 평균과 비교해 세계 OHC 편차 1960-2021 앙상블 평균 시계열과 앙상블 표준 편차 (2개 표준 편차, 음영). 앙상블 평균은 통합된 국제 데이터 및 분석 노력의 결과를 업데이트(각주 24 참조)한 것으로, 사용된 모든 자료는 의 섹션에서 참조할 수 있다. 값은 60°S와 60°N 사이의 해양 표면적에 대해 주어지고, 각 결과의 300m 수심 측량으로 제한된다. 2021년 앙상블 평균 OHC(0-2,000m) 편차는 앙상블 스프레드와 함께 별도의 지점으로 추가되었고, 해양 열함유량 데이터 섹션에 나열된 4개 자료에 기반한다. 출처: Updated from von Schuckmann et al., 2016 (see footnote 22).

2006년에 처음으로 목표에 가까운 전역 커버리지를 달성한 자동 관측용 부표의 Argo 네트워크 배포로 이제 OHC 변화를 2000 m 깊이까지 일상적으로 측정할 수 있다.^{19,20}

다양한 연구 그룹이 세계 OHC 추정치에 대한 연구를 진행했으며, 모든 연구 결과, 지속적인 해양 온난화를 보여준다(그림 4). 다양한 통계적 데이터 격차 처리 방법, 어떤 기후값 혹은 도구적 편향 처리 기법을 사용하느냐에 따라, 1년-10년 규모에서 각 추정치 간에 차이가 발생한다.^{21,22,23} 그리고 2021년까지 해양 온난화의 세계적 변화에 대한 국제적 관점을 제공하기 위해 공동의 노력이 이루어졌다.²⁴

해양 상층부 수심 2000m는 2021년에도 계속해서 온난화되었으며 미래에도 계속 온난화될 것으로 예상되며, 이는 향후 수백, 수천년 동안에는 되돌릴 수 없다.^{25,26} 2021년의 해양 열함유량은 2020년 값을 14 ± 9 ZJ 초과하여 기록상 가장 높았다(그림 4). 모든 데이터 세트는 해양 온난화 속도가 특히 지난 20년 동안 급격히 증가했음을 나타낸다. 2006-2021년(1971-2021) 기간 동안 0-2000m 깊이층(해양 표면을 기준으로)에 대한 해양 온난화 속도는

¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

¹⁸ Abraham, J. P.; Barlinger, M.; Bindoff, N. L. et al. A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change. *Reviews of Geophysics* 2013, 51 (3), 450-483. <https://doi.org/10.1002/rog.20022>.

¹⁹ Riser, S. C.; Freeland, H. J.; Roemmich, D. et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change* 2016, 6 (2), 145-153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.

²⁰ Roemmich, D.; Alford, M. H.; Claustre, H. et al. On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science* 2019, 6, 439. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00439>.

²¹ Boyer, T.; Domingues, C. M.; Good, S. A. et al. Sensitivity of Global Upper-Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies. *Journal of Climate* 2016, 29 (13), 4817-4842. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0801.1>.

²² von Schuckmann, K.; Palmer, M. D.; Trenberth, K. E. et al. An imperative to monitor Earth's energy imbalance. *Nature Climate Change* 2016, 6, 138-144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>.

²³ Cheng, L.; Abraham, J.; Goni, G. et al. XBT Science: Assessment of Instrumental Biases and Errors. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2016, 97 (6), 924-933. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/6/bams-d-15-00031.1.xml>.

²⁴ von Schuckmann, K.; Cheng, L.; Palmer, M. D. et al. Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth System Science Data* 2020, 12 (3), 2013-2041. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>.

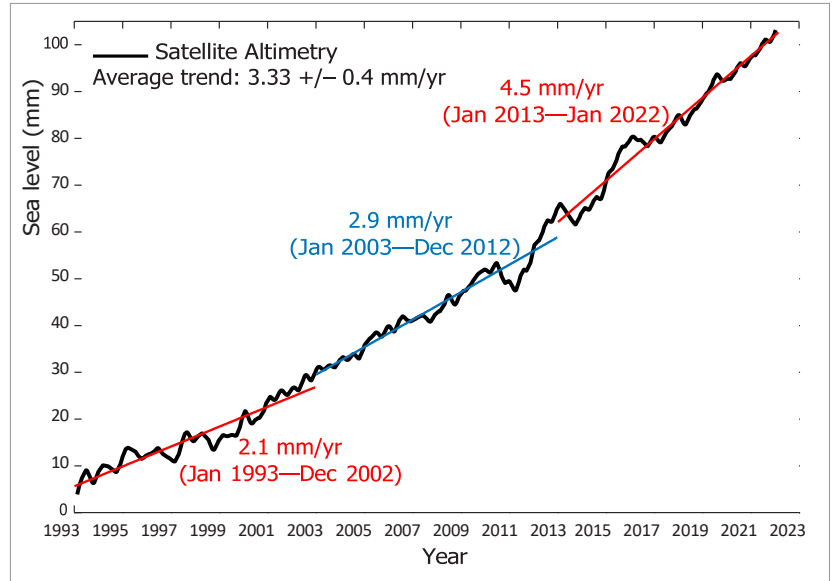
²⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

²⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01_SROCC_SPM_FINAL.pdf.

1.0(0.6) ± 0.1 Wm⁻²에 도달했다. 비교를 위해 2006-2021년(1971-2021) 기간 동안 상부 700m 깊이에 대한 값은 0.7(0.4) ± 0.1 Wm⁻²이다. 2000m 수심 아래에서 해양은 0.07 ± 0.04Wm⁻²의 낮은 비율²⁷에도 불구하고 온난화되었다.

해수면

지구 평균 해수면(GMSL: Global mean sea level)은 기후 시스템의 많은 구성요소에서 발생하는 변화를 통합한다. 년간에서 수십 년까지의 기간에서 GMSL의 변화는 해수의 열팽창, 육지 얼음의 용해 및 육지의 수역과 물의 교환을 통한 해양 온난화로 인해 발생한다. 1990년대 초부터 고정밀 고도계 위성으로 측정된 GMSL은 1993년과 2002년 사이에 연간 2.1 mm, 2013년과 2021년 사이에 연간 4.5 mm 증가했으며, 이는 대부분 빙상에서 얼음 덩어리의 가속화된 손실로 인해 기간 사이에 2배 증가한 것이었다.²⁸ 2021년에 GMSL은 사상 최고 기록을 경신했다. GMSL이 일시적으로 수 밀리미터 양 또는 음의 편차(아노말리)를 보여주었던 과거 엘니뇨, 라니냐가 발생한 해(예를 들면 1997/1998, 2010/2011, 2015/2016)와 비교할 때, 2021년은 GMSL의 증가가 두드러졌고, 이는 장기적인 추세를 보였다(그림 5).



1993년 이후 해수면은 거의 모든 곳에서 상승했지만 균일하게 상승하지는 않았다. 해수면 변화의 지역적 패턴은 해양 열 함량과 염도의 국지적 변화에 의하여 좌우된다. 몇몇 지역은 지구 평균보다 훨씬 더 빠른 해수면 상승 속도의 영향을 계속 받고 있다(지역 및 전 지구 해수면의 차이를 나타내는 그림 6 참조). 이는 특히 서쪽의 열대 태평양, 남서 태평양, 북대평양, 남서 인도양 및 남대서양의 경우에 해당한다. 다른 지역에서

그림 5. 고정밀 위성 고도계에 근거하여 1993년 1월부터 2022년 1월까지 세계 평균 해수면의 변화(검은색 곡선). 컬러 직선은 세계의 연속 시간 범위에 대한 평균 선형 추세를 나타낸다(1993년 1월 - 2002년 12월, 2003년 1월 - 2012년 12월, 2013년 1월 - 2022년 1월). 출처: AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).

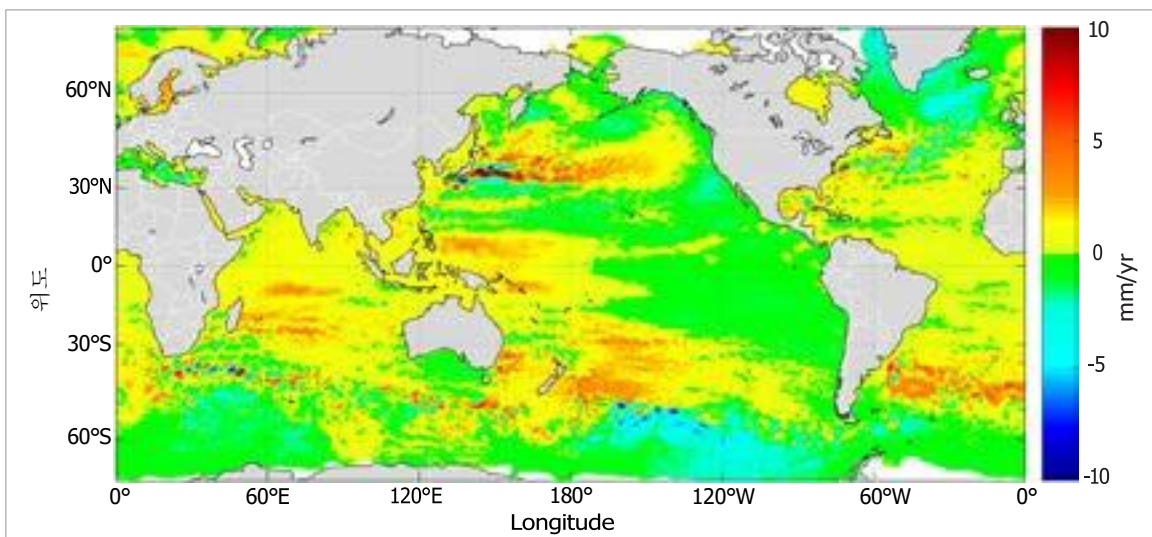


그림 6. 위성 고도계에 기초하여 1993년-2020년 동안 세계 평균 추세가 제거된 후(mm/yr) 해수면의 지역 추세 패턴. 실제 해수면은 거의 모든 곳에서 증가했다. 출처: Copernicus Climate Change Service (<https://climate.copernicus.eu>).

²⁷ Update from Purkey, S. G.; Johnson, G. C. Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets. *Journal of Climate* 2010, 23, 6336-6351. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3682.1>.

²⁸ WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993-present. *Earth System Science Data* 2018, 10 (3), 1551-1590, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.

그림 7. (a)

2021년(참조 기간 1982-2011년)에 각 픽셀에서 발생한 가장 높은 MHW 범주(정의는 해양 폭염 및 해양 한파 데이터 참조)를 보여주는 글로벌 지도. 열은 회색은 1년 동안 픽셀에서 MHW가 발생하지 않았음을 나타낸다.

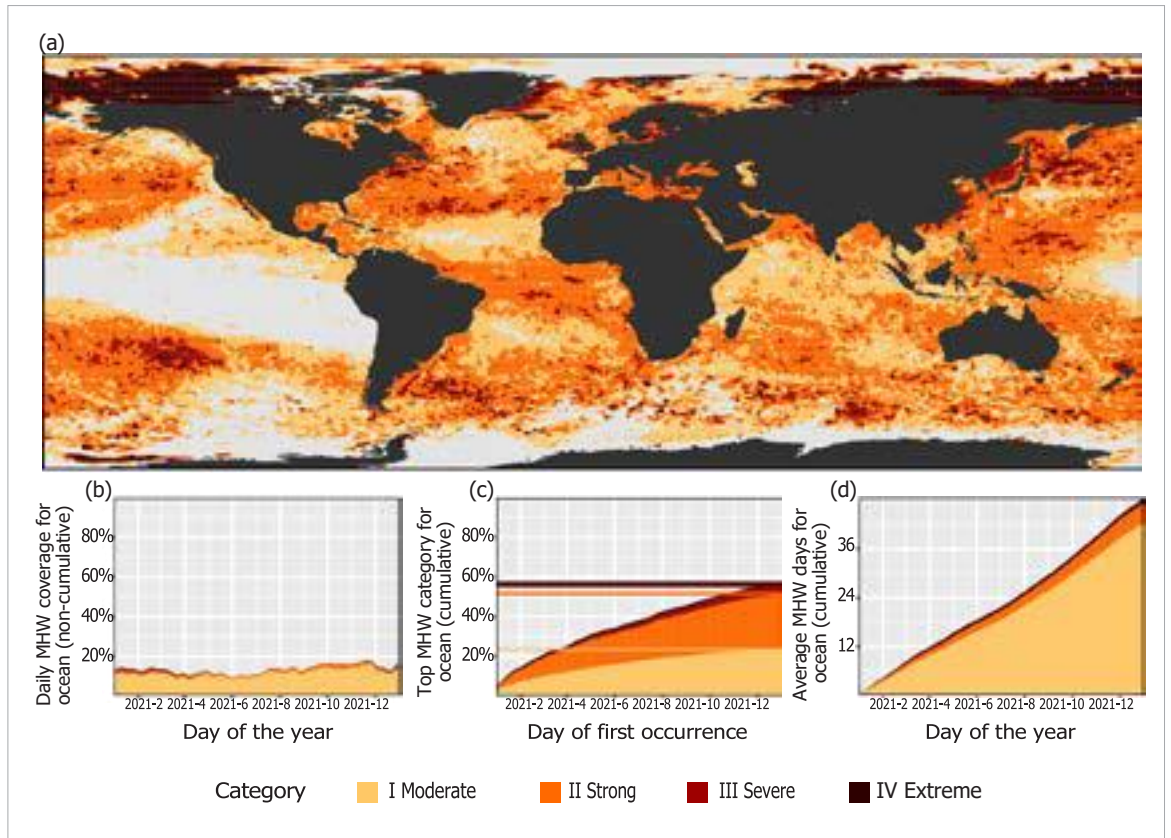
(b) 연중 특정 날짜에 MHW가 발생하는 해양 표면의 백분율을 보여주는 중첩 막대 그래프.

(c) 1년 동안 MHW가 발생한 해양 표면의 누적 백분율을 보여주는 누적 막대 그림.

참고: 이들 값은 처음에 픽셀에서 가장 높은 MHW 범주가 발생한 연도에 기반하기 때문에 픽셀은 두 번 계산되지 않는다. 이 그림의 수평선은 MHW의 각 범주에 대한 최종 백분율을 나타낸다.

(d) 해양 표면에서 평균을 낸 MHW의 누적 일수를 보여주는 중첩 막대 그래프.

참고: 이 평균은 가중치가 적용된 픽셀당 MHW 일수의 누적 합계를 해당 픽셀의 표면적으로 나누어 계산한다. 데이터는 국립 해양기상청 최적 보간 해수면 온도(NOAA OISST: National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)에서 가져온 것이다.
출처: Robert Schlegel



그린란드 주변과 아이슬란드의 남부, 남극 대륙 주변의 남극해 등의 지역 해수면은 지구 평균보다 더 천천히 상승했다. 해수면의 경향 패턴은 지난 30년의 고도 측정 동안 약간만 변했을 뿐이고 연간 변화는 작다.

해양 폭염 및 해양 한파

육지의 폭염과 한파와 유사하게 해양폭염(MHW)과 해양 한파(MCS)는 바다에 영향을 미치는 장기간의 극심한 더위 또는 추위이다. 해양의 폭염과 한파는 해양 생물과 종속 공동체²⁹에 다양한 결과를 초래할 수 있고, MHW는 20세기에 더욱 빈번해졌다. 위성으로 해수면 온도를 검색하여 MHW와 MCS를 모니터링하고 있고, 이들은 중간, 강함, 심각함 또는 극단으로 분류된다. (정의는 해양 폭염과 한파 데이터를 참조한다.)

대부분의 바다에서 2021년에 적어도 한번의 "강력한" MHW가 발생했다(그림 7). 더블딥(double-dip) 라니냐와 관련된 평균 이하의 해수면 온도로 인해 (엘니뇨-남방진동(ENSO) 참조) MCS가 전반적으로 나타나는 전 세계 해양의 유일한 지역 중 하나인 동부 적도 태평양에서는 MHW가 발생하지 않았다(그림 8). 라프테프 해와 보퍼트 해에 2021년 1월부터 4월까지 "심각함"과 "극단" MHW가 발생하였다. 그린란드의 동쪽(8월), 스발바르의 북쪽(10월) 그리고 로스 해 동쪽(12월)의 빙하 지역에서 눈에 띄는 "극단적인" MHW가 발생했다. 2021년에는 멕시코 만류의 극쪽으로 확장되는 것과 같이 변동성이 큰 지역을 제외하고 거의 모든 MCS가 "중간" 이었다.

2021년의 MHW 일평균 커버리지가 13 %로, 이는 2016년 17 %, 2020년 16 % 기록보다 낮은 수준이다. 8년 연속

²⁹Smale, D. A.; Wernberg, T.; Oliver, E. C. J. et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change* 2019, 9 (4), 306–312. <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0412-1>.

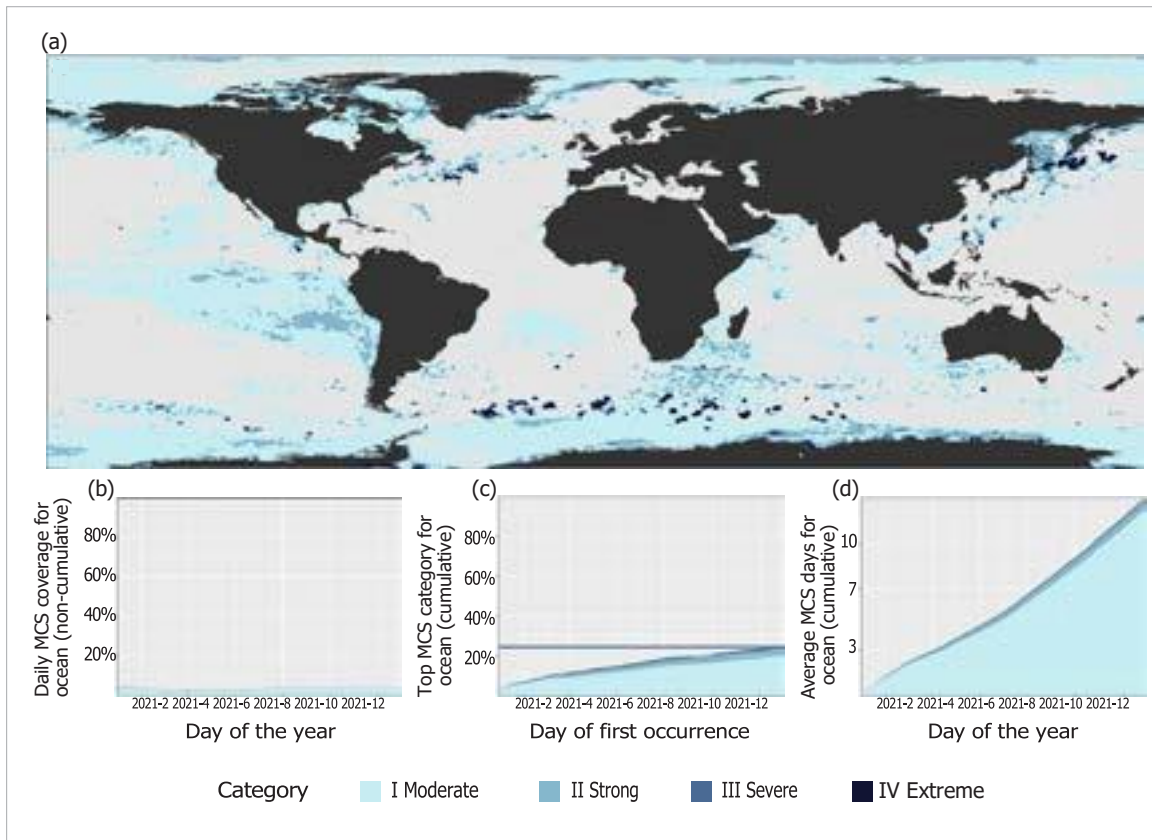


그림 8. 그림 7은 MHW가 아닌 MCS를 보여준다. 데이터는 국립 해양기상청 최적 보간 해수면 온도(NOAA OISST: National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)에서 가져온 것이다. 출처: Robert Schlegel

2021년 MHW의 가장 흔한 카테고리는 '강함'(28%)이었다. 전반적으로 57%의 해양 표면에서 2021년 동안 최소 하나의 MHW가 발생했다(그림 7c). 이는 2016년 기록인 65%보다 낮은 수치이고, 2012년(57%) 이후 가장 낮은 연간 커버리지이다.

2021년에 MCS에 의한 세계 해양의 평균 일일 커버리지는 4%였다(그림 8b). 이는 1982년의 최고 기록(7%)보다 낮은 값이고 2020년(4%)과 비슷한 수준이다. 2021년 동안 해수면의 총 25%에서 최소 한 번의 MCS가 발생했으며(그림 8c), 이는 2020년(25%)과 비슷하지만 1985년 기록(63%)보다는 훨씬 적다.

해양 산성화

해양은 연간 대기 중 배출되는 인위적 CO₂ 배출량의 약 23%를 흡수한다.^{30, 31} 이는 대기 중 CO₂ 농도 상승을 늦추고³² CO₂는 해수와 반응하여 해양의 pH를 감소시킨다.³³ 이는 해양 산성화로 알려진 프로세스이다(그림 9). 현재 세계 해양 산성화 속도는 5천 6백만년전 세계 탄소 주기의 큰 섭동과 관련이 있었던 팔레오세-에오세 최고온기(PETM)때 추정된 속도보다 적어도 10배 이상 높다.³⁴

³⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01_SROCC_SPM_FINAL.pdf.

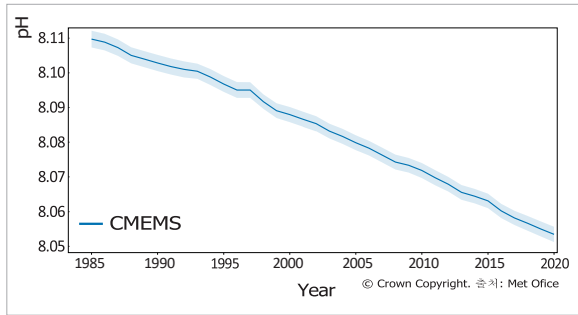
³¹ World Meteorological Organization (WMO). WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No.15: *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018*. Geneva, 2019.

³² Le Quéré, C.; Andrew, R. M.; Friedlingstein, P. et al. Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data* **2018**, *10*, 405–448. <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.

³³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>.

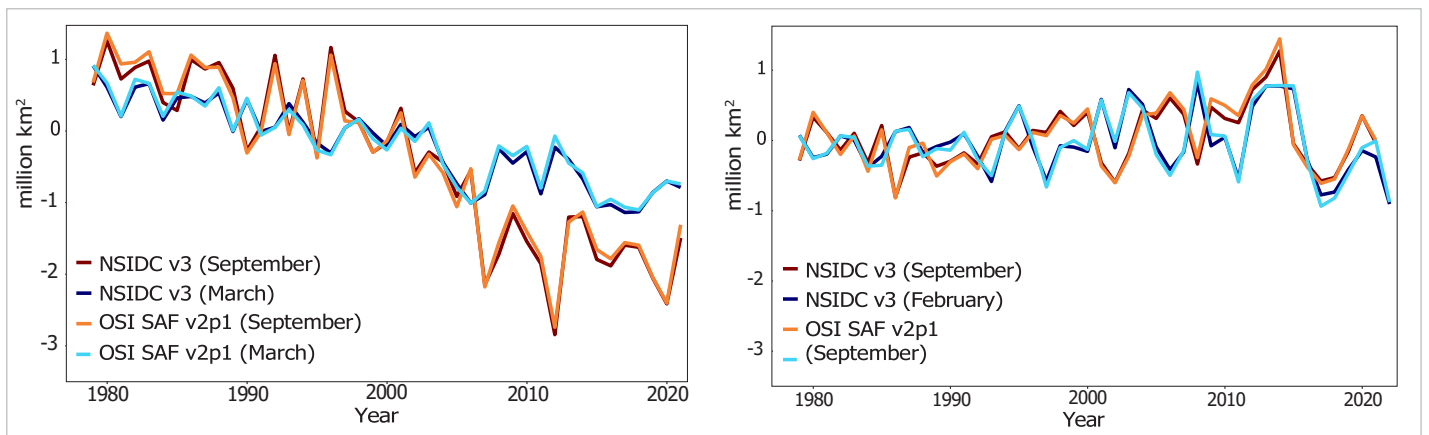
³⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Chapter 2, section 2.3.3.5 Ocean pH, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

그림 9. 1985-2020년 동안 세계 평균 해양 표면 pH(파란색). 음영 처리된 영역은 각 추정치에서 추정된 불확실성을 나타낸다. Copernicus Marine Environment Monitoring Service에서 제공한 데이터.



출처: Met Office, United Kingdom.

그림 10. 얼음 덮개가 최대인 달 동안 1981-2010년 북극(왼쪽)과 남극(오른쪽) 평균과의 해빙 면적 차이(북극: 3월, 남극: 9월) 그리고 1979-2021 동안 얼음 덮개가 최소인 달(북극: 9월, 남극: 2월). 출처: EUMETSAT OSI SAF v2p1 and National Snow and Ice Data Centre (NSIDC) v3 (Fetterer et al., 2017)에서 제공한 데이터 (빙하 데이터의 참조 세부사항 참조)



IPCC 6번째 평가 보고서는 " 해양 표면의 pH가 적어도 26,000년 동안 가장 낮았으며 현재의 pH 변화 속도는 적어도 그 이후로 전례가 없을 것이라고 매우 확신하고 있다"라고 결론 내렸다. 해양의 pH가 감소하면 대기로부터 CO₂를 흡수하는 능력 또한 감소한다.³⁵

해양 산성화는 유기체와 생태계 서비스를 위협하므로 식량 안보, 관광 및 해안 보호를 위협한다. 현지 및 지역 산성화는 해양 유기체 및 생물학적 과정과 관련성이 매우 높다. 하지만 CO₂ 수준에 영향을 미치는 다양한 요인으로 인해 해안 지역의 변동성은 높다. 지속 가능한 개발 목표(SDG) 14.3 및 관련 SDG 지표 14.3.1을 위해 제출된 해양 산성화 관측의 국가 데이터 세트("합의된 대표 샘플링 관측소에서 측정된 평균 해양 산도(pH)")는

해안선과 해양에서 해양 산성화에 대한 지속적이고 반복적인 관측과 측정의 필요성을 강조한다. 현재 글로벌 커버리지에는 차이가 있지만 SDG 지표 14.3.1에 대한 데이터 수집에 참여하는 국가의 수가 증가하면서 확인되는 것처럼 역량 배양 노력으로 많은 국가들이 산성화 데이터를 측정, 관리, 보고하는 능력이 증가되었다.

빙하권

빙하권은 지구의 얼어붙은 부분으로 구성된다. 빙하권에는 해빙, 빙하, 빙상, 눈 및 영구 동토층이 포함된다.

해빙

북극 해빙

2020/2021년 북극 겨울은 중앙 북극해의 해수면 압력은 이례적으로 높았다(북극 진동(AO) 참조). 결과적으로 고기압성 바람 패턴으로 인해 더 두꺼운 다년생 얼음을 보퍼트 해로 몰아넣었다.³⁶ 2021년, 북극 해빙의 최대 면적은 3월 21일 1,480만 km²에 도달했다.³⁷ 2021년 3월은 데이터 출처에 따라 기록(1979-2021년)에서 9번째 또는 10번째로 낮은 범위였다(그림 10). 사용된 데이터 세트에 대한 자세한 내용은 해빙 데이터를 참조한다.

³⁵ Middelburg, J. J.; Soetaert, K.; Hagens, M. Ocean Alkalinity, Buffering and Biogeochemical Processes. *Reviews of Geophysics* 2020, 58, e2019RG000681. <https://doi.org/10.1029/2019RG000681>.

³⁶ Mallett, R. D. C.; Stroeve, J. C.; Cornish, S. B. et al. Record winter winds in 2020/21 drove exceptional Arctic sea ice transport. *Communications Earth & Environment* 2021, 2, 149. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00221-8>.

³⁷ <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/03/arctic-sea-ice-reaches-uneventful-maximum>

녹는 속도는 녹는 시기 초기에 1981-2010년의 평균에 가까웠다. 하지만 라프테프 해와 동쪽 그린란드 해 지역에서 해빙 면적은 6월과 7월 초에 매우 빠르게 감소했다. 그 결과 북극 전역의 해빙 면적은 7월 상반기에 사상 최저치를 기록했다. 7월 월 평균은 기록상 두 번째에서 네 번째로 낮았으며(2012년 및 2019년과 같음) 상당한 지역적 대비를 보여주었다.³⁸(그림 11). 보퍼트 해와 추크치 해에서는 평년보다 더 많은 얼음(1981-2010)이 발견되었지만 시베리아와 유럽 지역(라프테프 해와 동쪽 그린란드 해)에는 평년보다 훨씬 적은 해빙이 발견되었다. 한 가지 예외는 동쪽 카라 해에 해빙이 1년 내내 유지되었다는 점이다. 7월 이후에는 환경이 급격히 바뀌었고 전체 북극해에서 추운 날씨가 지속되었다. 이로 인해 해빙이 녹는 속도가 느려졌고 2021년 8월은 녹는 속도가 기록상 10번째로 낮았다.

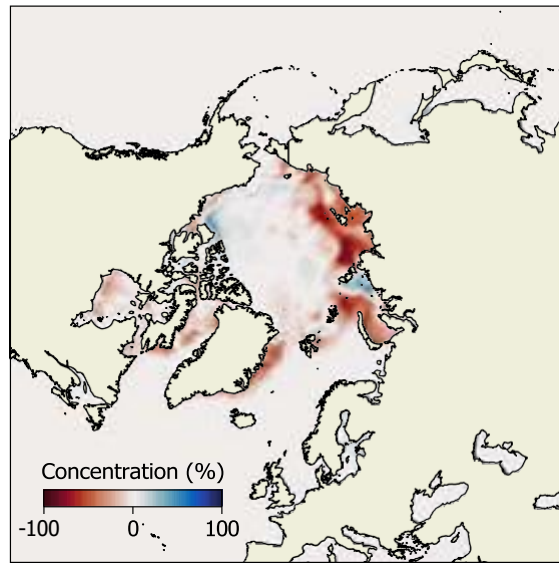


그림 11. 2021년 7월 북극 해빙 농도 이상(1981-2010년 평균과 다름). 빨간색은 평년보다 얼음이 적은 지역을 나타내고 파란색은 얼음이 더 많은 지역을 나타낸다. 출처: EUMETSAT OSI SAF data with research and development input from the European Space Agency Climate Change Initiative (ESA CCI).

8월에 녹는 속도가 느려지면서 최소 9월 해빙 면적은 최근 몇 년보다 더 많았지만 1981-2010년 평균보다는 훨씬 적으며 43년 동안의 위성 기록에서 12번째로 낮은 최소 해빙 면적을 나타낸다(그림 10). 2021년 최소 해빙 면적은 9월 16일에 472만 km²로 관측되었으며³⁹ 9월 평균 얼음 면적은 492만 km²로 1981-2010년 평균보다 훨씬 적었다.

남극 해빙

2021년 남극해 전체의 해빙 면적은 일반적으로 1981-2010년 평균보다 낮았으며, 2월 최소치 이전에는 평균보다 낮았고, 대부분의 겨울 동안 평균보다 약간 높았으며, 이례적으로 8월 말에 조기에 최대 해빙 면적이 발생했고, 연말까지 평균을 훨씬 밑도는 해빙 면적이 발생했다.

2021년 연간 주기에서 최소 해빙 면적이 260만 km²으로 2월 19일에 발생했으며, 이는 기록(1979-현재)상 15번째로 낮은 면적이다. 연간 최소 해빙 면적은 1990년대 초반에 크기가

증가하기 시작하여 2013년 최대 368만 km²에 도달한 후 2017년 208만 km²로 1979-2021년 기간 동안 가장 낮은 해빙 면적을 기록하였다. 그 이후로 연간 최소 면적은 천천히 증가했다. 2월에 대부분의 남극 해빙은 웨델 해에서 발견되었으므로 연간 최소 해빙 면적은 해당 지역의 지역적 변화를 많이 반영한다.

남극 해빙은 2021년 8월 30일에 연간 최대 면적인 1,880만 km²에 달했다. 이는 면지 측면에서 평균 규모에 가까웠고 43년 간의 자료 중 22번째로 큰 규모이다. 하지만, 이는 기록상 두 번째로 빠르게 최대 해빙에 도달한 경우로, 다른 하나의 경우는 2016년 8월에 나타난 경우였다.

9월 중순 이후 남극해 전체의 해빙 면적은 지속적으로 평균보다 낮았으며, 12월 24일에는 677만km²(평균보다 -182만km²)까지 감소하여 같은 날 기록상 3번째로 낮았다. 그 당시 얼음 면적은 대륙의 모든 부분에서 평균 미만이었지만 웨델 해, 벨링스하우젠 해 그리고 로스 해의 얼음 부족은 남극 전역의 이상에 가장 큰 영향을 미쳤다.

³⁸ Sea-ice cover for July 2021: <https://climate.copernicus.eu/sea-ice-cover-july-2021>

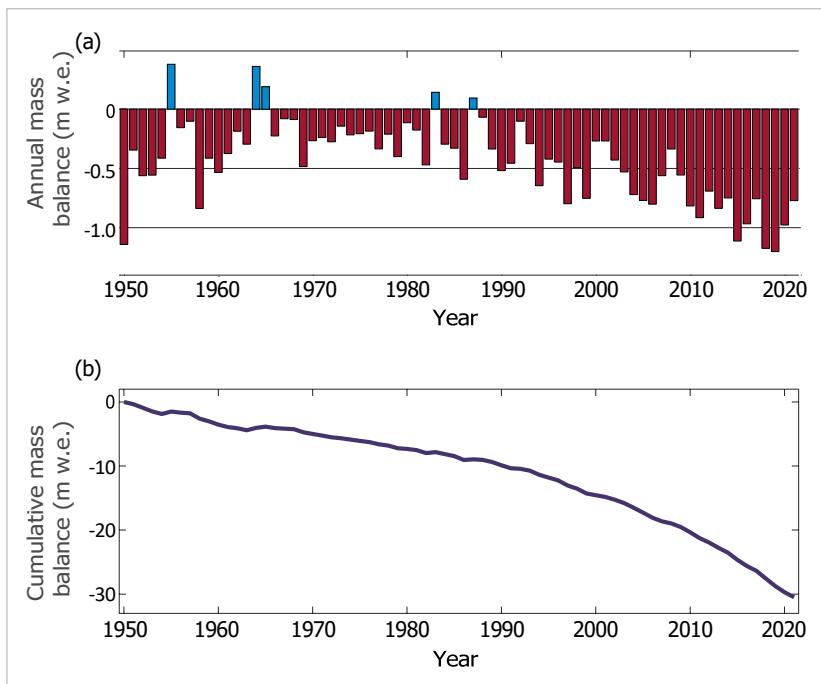
³⁹ <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/09/arctic-sea-ice-at-highest-minimum-since-2014>

빙하

빙하는 눈이 압착되어 생성된 얼음으로부터 형성되며, 녹으면서 형태가 변형되어 더 낮고 따뜻한 고도로 흘러내릴 수 있다. 빙하가 호수나 바다에서 끝나는 경우 얼음과 물이 만나는 곳에서 녹거나 빙하 전면이 갈라져 빙산이 형성되면 얼음 손실도 발생한다. 빙하는 기저 윤회의 변화, 해수 온난화 또는 빙붕 지지의 손실과 같은 기타 요인뿐만 아니라 온도, 강수량 및 햇빛의 변화에 민감하다.

2000-2019년 기간 동안 세계 빙하와 만년설(그린란드 및 남극 빙상은 제외)은 연간 $267 \pm 16\text{Gt}$ 의 평균 질량 손실이 발생했다.⁴⁰ 질량 손실은 2015-2019년 기간 후반에 연간 $298 \pm 24\text{Gt}$ 로 더 높았다. 몇몇 중위도 지역의 빙하는 2015년에서 2019년 사이에 세계 평균(연간 $0.52 \pm 0.03\text{m}$)의 두 배 이상 얇아졌다.

그림 12. 1950-2021년 세계 빙하 질량 균형(약 40개의 세계 기준 빙하 세트에서).
(a) 참조 빙하 세트의 평균 연간 질량 균형.
(b) 1950년 이후의 누적 질량 균형.
단위는 m w.e.이다.
출처: 데이터는 World Glacier Monitoring Service에서 제공하였다.
<http://www.wgms.ch>.



예를 들면 빙하가 뉴질랜드에서는 연간 1.52m, 알래스카에서는 연간 1.24m, 중부 유럽에서는 연간 1.11m, 서북 아메리카(알래스카 제외)에서는 연간 1.05m 얇아지고 있다.

국제빙하감시서비스(World Glacier Monitoring Service)는 장기간 관측된 42개의 참조 빙하 세트를 비롯하여 전 세계 빙하 질량 균형 데이터를 수집 및 분석한다. 빙하 연도 2020/2021년 동안 이러한 참조 빙하 중 32개에서 사용할 수 있는 예비 데이터는 -0.77m 물당량의 평균 세계 물질 균형을 나타낸다(m w.e.⁴¹ 그림 12). 이는 지난 10년 동안의 평균(2011-2020년 동안의 -0.9 m w.e.)보다 적은 질량 손실이지만 1991-2020년 기간 동안의 평균 질량 손실인 -0.66m w.e. 보다는 크다.

빙하 연도 2020/2021은 최근 몇 년보다 덜 음성적인 빙하 질량 균형이 특징이지만 수십 년의 시간 척도에서 질량 손실이 가속화되는 명확한 경향을 보인다(그림 12). 평균적으로 기준 빙하는 1950년 이후 33.5m(얼음 당량)만큼 얇아졌으며, 1980년 이후에는 76%(25.5m)가 얇아졌다.

캐나다 서부의 이례적인 빙하 질량 손실

북미 빙하의 질량 손실은 지난 20년 동안 가속화되었다. 서북 아메리카의 빙하 질량 손실은 2000-2004년의 기간 동안 연간 $53 \pm 13\text{Gt}$ 에서 2015-2019년의 기간 동안 연간 $100 \pm 17\text{ Gt}$ 로 증가했다.⁴²

2021년의 이례적인 따뜻하고 건조한 북반구 여름(폭염과 산불 참조)은 캐나다의 알버타와 남부의 브리티시 컬럼비아 그리고 미국의 태평양 연안 북서부의 대부분의 빙하 질량 손실이 악화되었다. 브리티시 컬럼비아의 코스트 산맥에서 Place 및 Helm 빙하는 1965년에 측정이 시작된 이후 어느 해보다 2020-2021년 기간 동안 더 많은 질량이

⁴⁰ Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 2021, 592 (7856), 726-731. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03436-z>.

⁴¹ Metres water equivalent is the depth of water that would result if the lost ice were melted and spread across the surface area of the glacier.

⁴² Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 2021, 592 (7856), 726-731. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03436-z>.

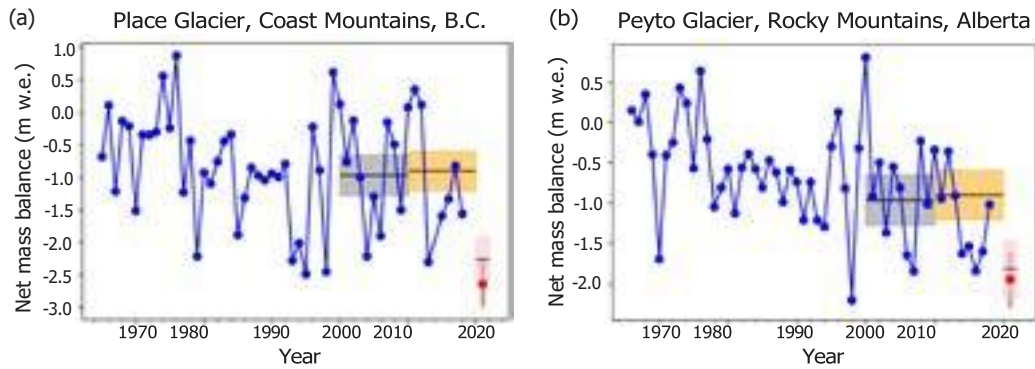


그림 13. (a) 1965-2021 동안의 Place Glacier, British Columbia, Peyto Glacier 및 Alberta 의 빙하 질량 균형. 1965-2019 년 데이터의 출처는 World Glacier Monitoring Service 이다. 2021 년 동안의 질량 균형 추정치는 LiDAR 조사에서 가져온 것이며 Pelto 등(2019)에 의해 만년설 밀도가 수정되었다 (빙하 질량 균형 데이터 참조). 파란색과 노란색 수평 막대는 Hugonnet et al.(2021)의 해당 지역에 대한 10 년 평균 값을 나타낸다 (빙하 질량 균형 데이터 참조).

2021 년의 데이터는 불확실성(분홍색 막대), 동시대의 LiDAR 에서 도출된 빙하 지역(빨간색 원)을 사용한 질량 균형 계산, Hugonnet 등(2021)이 사용한 Randolph Glacier Inventory 빙하 지역/윤곽선에서 계산된 특정 질량 균형을 나타낸다 (검정색 십자선). (b) 2020/2021 질량 균형 연도 동안 캐나다 로키 산맥의 컬럼비아 빙원에서 LiDAR 로부터 도출된 고도 변화.

손실되었다(그림 13a). 캐나다 로키산맥에서 Peyto 빙하의 질량 손실은 1998년에 발생한 강력한 엘니뇨에 이어 1965년 이후로 두 번째 큰 질량 손실이었다(그림 13b). 반복적인 LiDAR 조사⁴³는 각각 Place, Helm 및 Peyto 빙하에 대한 -2.66, -3.30, -1.95m w.e.의 질량 균형을 나타낸다. 이는 2015년에서 2019년 사이에 지역의 평균적인 빙하가 얇아지는 속도의 약 2배에 해당된다.

2021년 8월 중순까지 이 지역의 대부분의 산악 빙하에는 눈이 거의 남아 있지 않았고, 이들 빙하의 대부분은 다년간에 쌓인 눈이 빙하로 변하는 만년설 존(firn zone)을 손실했다. 2021년 여름 광범위한 지역 산불 현황으로 인한 그늘음과 재를 포함한 미립자 퇴적은 빙하의 표면이 7월과 8월에 비정상적으로 어두웠고 평소보다 더 많은 햇빛을 흡수하여

극심한 질량 손실의 원인이 되었음을 의미했다. 브리티시 컬럼비아의 Kokanee 빙하는 2021년에 총 부피의 5%-6%를 손실했고, 로키산맥(210km²)에서 가장 큰 빙원인 컬럼비아 빙원은 약 0.34Gt의 얼음을 손실했다(그림 13c).

빙상(ICE SHEET)

빙상은 50000 km²보다 큰 면적을 덮고 있는 빙하의 광활한 공간이다. 현재 기후에서 그린란드와 남극 대륙에서 발견된 두 개의 빙상이 존재한다.

그린란드 빙상

그린란드 빙상의 총 질량 균형 변화는 강설량과 빙상에서 흘러나온 녹은 물 간의 차이로 정의되는 표면 질량 균형, 빙산이 분리되고

⁴³ Pelto, B. M.; Menounos, B.; Marshall, S. J. Multi-year evaluation of airborne geodetic surveys to estimate seasonal mass balance, Columbia and Rocky Mountains, Canada. *The Cryosphere* 2019, 13, 1709-1727. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1709-2019>.

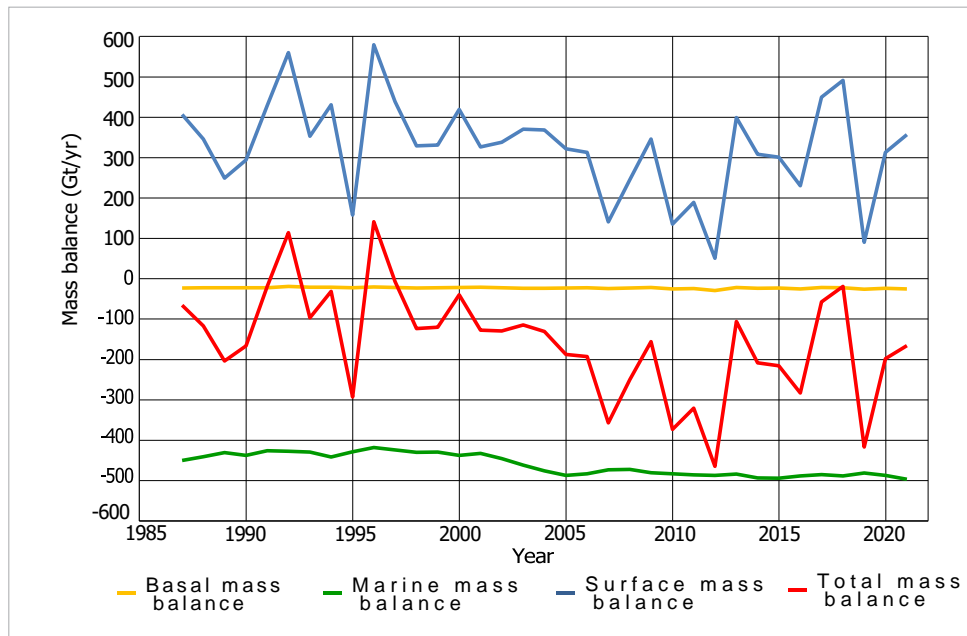
바다와 접촉할 때 빙하설이 녹으면서 주변부에서 손실된 질량의 합인 해양 질량 균형, 그리고 지열로 인한 기저부 용해와 빙하 기저부에서 미끄러지고 얼음의 변형에 의해 발생하는 마찰열로 구성된 기저 질량 균형을 결합효과를 반영한다.

그린란드의 경우 지역 기후 모델⁴⁴의 앙상블은 2021년 질량 균형 연도(2020년 9월 1일부터 2021년 8월 31일까지)에 대해 -166Gt의 추정된 총 질량 균형⁴⁵을 보여준다. 위성 관측과 PROMICE 지상 기상 관측소 네트워크에 근거한 추정치는 동일 기간 동안 - 85Gt의 총 질량 균형을 보여준다.⁴⁶

NASA⁴⁷에서 처리한 GRACE 위성 중력 데이터는 동일 기간 동안 -126Gt의 총 질량 균형을 제공한다.⁴⁸ 질량 손실의 추정된 규모는 다른 방법과 가정으로 인해 다르지만 그린란드 빙상은 25년 연속으로 음의 질량 균형을 가졌다는 사실에 동의한다.

1986년 9월부터 2021년 8월까지의 기간 동안의 기후 모델링에 따르면 그린란드 빙상은 총 5,511Gt의 얼음⁴⁹이 손실되었고, 연간 평균 질량 손실은 157Gt이었다(그림 14). 질량 손실은 지난 20년 동안 가속화되었다. GRACE 및 GRACE-FO 위성 중력 데이터⁵⁰에 따르면 그린란드에서는 2002년 4월부터 2021년 11월까지 5151Gt의 얼음이 손실되었으며,

그림 14. 1987-2021년 그린란드 빙상의 총 질량 균형을 구성요소. 파란색: 표면 질량 균형(SMB), 녹색: 해양 질량 균형(MMB, 방출이라고도 함), 주황색/노란색: 기저 질량 균형(BMB), 빨간색: 총 질량 균형(TMB), SMB, MMB 및 BMB의 합계(각주 44 참조). 출처: Mankoff, K. D.; Solgaard, A.; Colgan, W. et al. Greenland Ice Sheet solid ice discharge from 1986 through March 2020. *Earth System Science Data* 2020, 12 (2), 1367-1383. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1367-2020>.



⁴⁴ Based on the average of three regional climate and mass balance models. See Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week. *Earth System Science Data* 2021, 13, 5001-5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.

⁴⁵ A negative mass balance indicates a loss of ice mass; a positive mass balance indicates a gain.

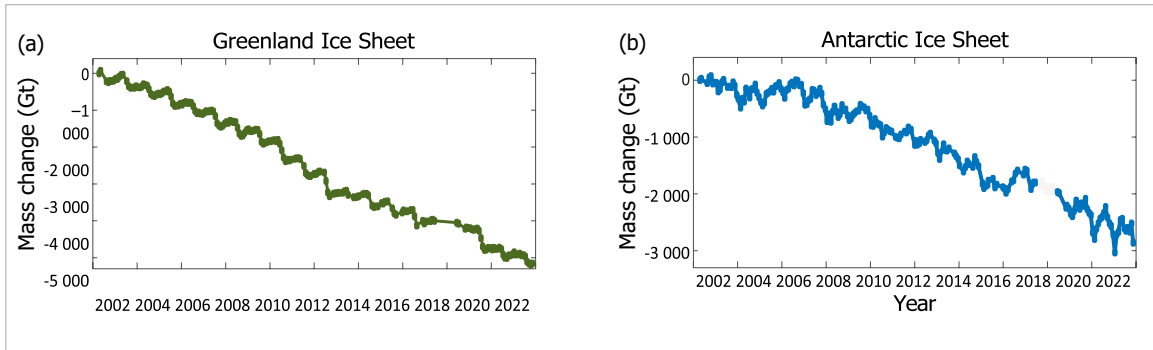
⁴⁶ Moon, T. A.; Tedesco, M.; Box, J. E. et al. Greenland Ice Sheet. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/546g-ms61>.

⁴⁷ <https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/>.

⁴⁸ Wiese, D.N.; Yuan, D.-N.; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

⁴⁹ Based on the average of three regional climate and mass balance models. See Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week. *Earth System Science Data* 2021, 13, 5001-5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.

⁵⁰ Wiese, D.N.; Yuan, D.-N.; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.



평균 질량 손실률은 연간 276Gt이었다(그림 15). 2021년 그린란드의 질량 균형은 35년 동안의 평년치에 가까웠지만 질량 손실은 위성 중력 데이터를 사용할 수 있는 2002-2020년 기간의 평균 미만이었다.

그린란드의 2021년 여름 해빙 시즌 동안 해빙 범위는 초여름까지 장기 평균에 가까웠지만 온도와 해빙수 유출은 2021년 7월 말과 8월에는

평년치보다 훨씬 높았다(그림 16).⁵¹ 8월의 기상 현상은 배핀 만(Baffin Bay)에서 유입되어 그린란드 남서부와 중부 대부분을 덮은 따뜻하고 습한 기단과 관련이 있었다. 8월 14일, 그린란드 빙상(3,216m)의 가장 높은 지점인 서밋 스테이션(Summit Station)에서 몇 시간 동안 비가 관측되었고, 기온은 약 9시간 동안 영상을 유지했다.^{52,53}

그림 15. 2002년 4월부터 2021년 11월까지 그린란드와 남극 빙상의 질량 변화에 대한 GRACE 및 GRACE-FO 위성 중력 데이터(각주 48 참조). 그린란드 빙상은 이 기간 동안 연간 평균 276 Gt의 질량을 손실했고, 남극 대륙의 평균 질량 손실 비율은 연간 152 Gt이었다. 이를 합치면 매년 전 세계 해수면이 약 1.2 mm 상승하는 것과 같다.

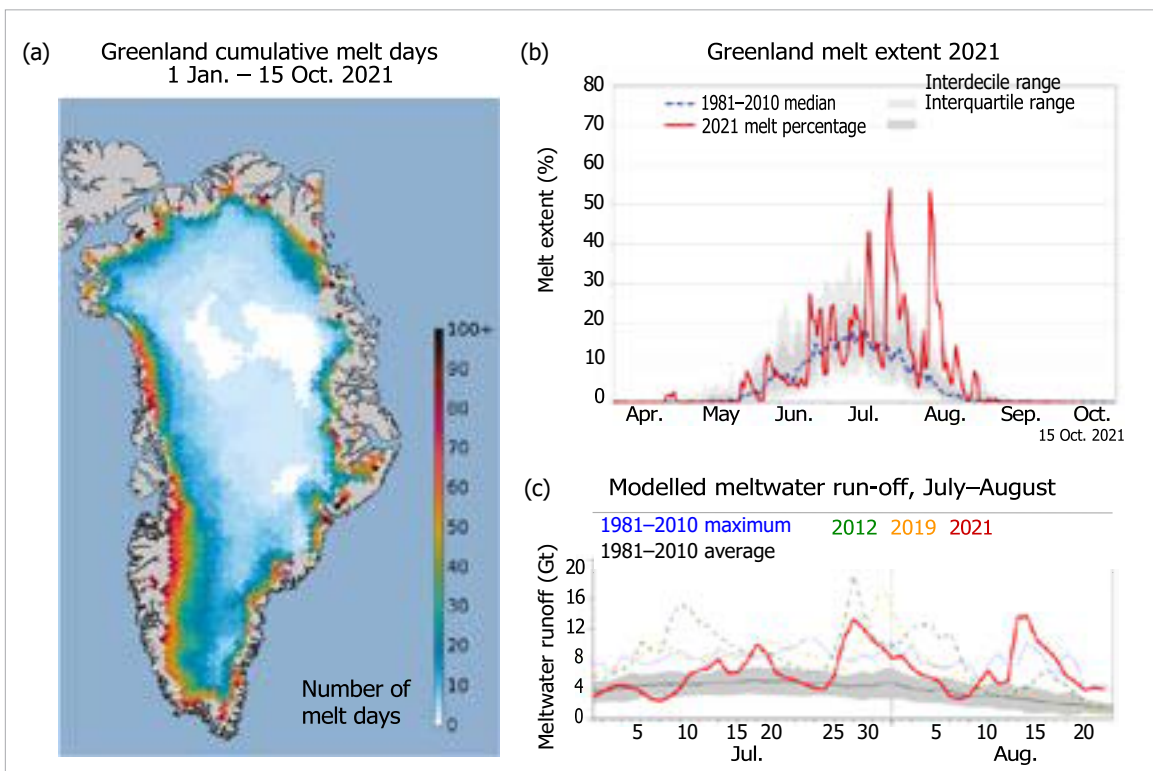
그림 16. (a) 2021년 그린란드 빙상의 녹음 용융 일수는 2021년 여름에 대부분의 빙상의 용융 영향을 나타낸다.

(b) 1981년부터 2010년까지 해빙 범위 중앙값을 기준으로 그린란드의 2021년 해빙 시즌까지의 빙상의 해빙 범위(%).

(c) 2012년-2019년의 최근 광범위한 녹는 시기와 비교하여 2021년 7월부터 8월까지 그린란드 해빙수가 유출되었고, 이는 서밋에서 8월 중순 강우 현상과 관련된 후기 계절 빙상 용해의 기록적인 양을 나타낸다.

출처: 모든 이미지는 USA National Snow and Ice Data Center <http://nsidc.org/greenland-today/>에서 제공했고, Ted Scambos and the Greenland Ice Sheet Today 팀에 감사를 드린다. (a)와 (b)의 분석은 Thomas Mote, University of Georgia, USA에서 수행했고, (c)의 해빙수 유출은 지역 기후 모델, MARv3.12에서 추정되었다.

(출처: courtesy of Xavier Fettweis, University of Liège, Belgium.)



⁵¹ <http://nsidc.org/greenland-today/2021/08/rain-at-the-summit-of-greenland/>

⁵² Moon, T. A.; Tedesco, M.; Box, J. E. et al. Greenland Ice Sheet. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/546g-ms61>.

⁵³ <http://nsidc.org/greenland-today/2021/08/rain-at-the-summit-of-greenland/>

서밋에는 강우량에 대한 이전 보고는 없고, 이는 이 위치에서 영상 온도가 기록된 올해의 가장 최근 날짜이다. 서밋의 해빙 현상은 1995년, 2012년 및 2019년에도 관측되었다. 빙하 코어 기록에 따르면 1995년 이전에 서밋에서 마지막으로 해빙 현상이 발생한 시기는 19세기 후반이었다.⁵⁴

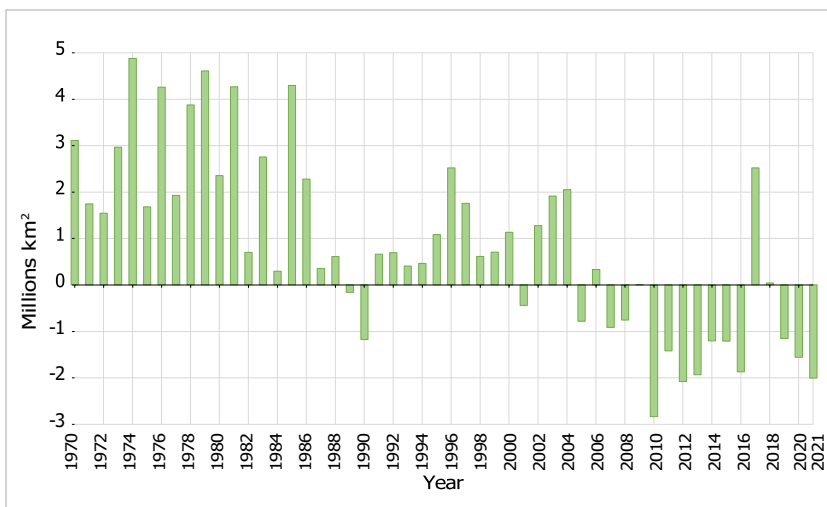
남극 빙상

남극 빙상에는 그린란드에 비해 무시할만한 수준의 표면 용해가 발생하지만 일부 용해는 일반적으로 11월과 2월 사이에 남극 반도와 일부 저지대 빙붕 및 해안 지역에서 발생한다. 남극 대륙의 2020/2021 여름 해빙 시즌은 온화했으며 1990-2020년 평균 이하였다.⁵⁵ 2020년 12월 중순에 웨델 해의 북부 필히너 빙붕에 강력하지만 잠깐의 용해 현상이 발생했다. 남극 대륙의 여름 해빙기가 2021년 2월 중순에 종료되었다. 올해의 가장 강한 양의 해빙 이상은 남극 반도의 남은 라슨 B 및 C

빙붕 위에서 발생했다. 대부분의 다른 위치에서는 평균 1990-2020년의 조건에 비해 거의 평년치에 가까운 해빙 범위가 발생했다.

2020/2021년 여름 남극 대륙의 평년치에 가까운 표면 해빙에도 불구하고 GRACE-FO 위성 중력 데이터에 따르면 남극 빙상은 2021년 초에 계속해서 질량이 감소했으며(그림 15), 이는 서부 남극 대륙의 아문센 해의 분리 및 해양 빙하 해빙과 관련이 있다. 2010년 이후 남극 빙상의 질량 손실은 주로 아문센 해의 빙상의 해양 온난화로 촉발된 Thwaites 빙하의 얇아짐 그리고 지반선 후퇴에 의해 주도되었다.⁵⁶ GRACE-FO 데이터⁵⁷에 따르면 남극 대륙은 2020년 11월부터 2021년 11월까지 296Gt의 질량이 손실되었으며, 이는 2002년부터 2021년까지 남극 대륙의 평균 얼음 손실률의 약 두 배에 이른다(그림 15).

그림 17. 1991-2020년 평균에 비해 1970-2021년 기간 동안 북반구(NH)의 5월 적설량 범위(SCE) 이상치.
출처: Rutgers Northern Hemisphere Snow Cover Extent product: <https://snowcover.org>.



는

북반구(NH)의 계절적 적설량은 늦은 봄과 여름에 장기적으로 감소하고, 가을에는 비교적 안정되거나 증가한다는 증거가 있다.⁵⁸ 2021년의 적설 범위(SCE)는 Rutgers 북반구(NH) 적설 범위(SCE) 결과 분석에 기초해 1970-2021년의 SCE 기록에서 세 번째로 낮은 -2백만 km²의 5월 북반구 적설량 이상과 함께 이러한 장기 추세와 일치했다(그림 17).⁵⁹ 북반구 봄 눈 범위의 감소는 전체 데이터 세트에서 일관되며, 2021년에는 유라시아 고위도 지방에서 평년치 이하의 적설량에 의해 주도되었다.

⁵⁴ Meese, D. A.; Gow, A. J.; Grootes, P. et al. The Accumulation Record from the GISP2 Core as an Indicator of Climate Change Throughout the Holocene. *Science* 1994, 266 (5191), 1680-1682. <https://doi.org/10.1126/science.266.5191.1680>.

⁵⁵ <http://nsidc.org/greenland-today/2021/04/the-antarctic-2020-to-2021-melt-season-in-review/>

⁵⁶ Velicogna, I.; Mohajerani, Y.; Landerer, G. A. F. et al. Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-On Missions. *Geophysical Research Letters* 2020, 47 (8), e2020GL087291. <https://doi.org/10.1029/2020GL087291>. See also Rignot, E.; Mouginot, J.; Scheuchl, B. et al. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979-2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2019, 116 (4) 1095-1103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>.

⁵⁷ Wiese, D.N.; Yuan, D.-N.; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

⁵⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

⁵⁹ <https://snowcover.org>



그림 18. 활성층 분리 슬라이드와 후퇴적 해빙 슬러프를 포함하여 영구 동토층 해빙과 관련된 최근의 경사 불안정성. 전면에서 많은 양의 물질이 강으로 밀려들어 파편설을 형성한다. 캐나다 서북부의 노르만 웰즈 남쪽의 매켄지 산맥의 산기슭. 출처: Government of Northwest Territories, Canada.

유라시아 북극의 2021년 5월과 6월 눈덮힌 범위는 1967-2021년 기간 동안 각각 5번째와 3번째로 낮았다.⁶⁰

영구 동토층

영구 동토층은 지구의 노출된 육지 면적의 약 8분의 1 아래에서 발생한다. 온도가 적어도 연속 2년 동안 0 °C 이하로 유지되는 곳은 지면이다. 영구 동토층 해빙은 이전에 동결된 유기 물질로부터 나온 온실 가스의 배출을 비롯하여 경관 불안정 및 기타 영향을 초래할 수 있다. 영구 동토층의 온도가 0 °C에 가까워지면 얼음과 물 사이의 상 변화로 인해 얼음이 풍부한 지면의 온도 변화가 정제된다. 온도 상승은 상 변화로 인해 몇 년 또는 수십 년 동안 0 °C 근처에서 안정된다 하더라도 영구 동토층 온난화 및 해빙이 지반 안정성(침하 및 질량 이동 포함), 수문학, 생태계 및 기반시설에 미치는 영향은 종종 명확하게 볼 수 있다(그림 18).

1990년대부터 전지구동토층네트워크(GTN-P)는 영구 동토층 온도(시추공에서 측정된

온도)와 활성층 두께(영구 동토층 위의 계절적으로 해빙된 층의 최대 두께) 데이터 세트를 수집했다. GTN-P 결과는 활동을 지속하기 위해 주로 연구 프로젝트에 의존한다. 산지와 극지방에서 운영되는 국가 및 지역 네트워크의 장기 데이터 시리즈는 사용 가능한 가장 최근 데이터인 2020년까지 과거 온난화 추세가 계속됨을 보여준다.

성층권 오존

몬트리올 의정서가 체결된 이후 할론과 염화불화탄소(CFC)의 사용이 중단된 것으로 보고되었지만 대기 중 농도는 계속 모니터링되고 있다. 오랜 수명으로 인해 이러한 화합물은 수십 년 동안 대기 중에 남아 있다. 새로운 배출이 없더라도 8월부터 12월까지 남극 대륙의 오존을 완전히 파괴하기에 충분한 염소와 브롬이 여전히 존재한다. 따라서 낮은 오존 농도 지역인 남극 오존 구멍의 형성은 매년 봄 현상으로 계속되고 있으며,

⁶⁰ Mudryk, L.; Chereque, A. E.; Derksen, C. et al. Terrestrial Snow Cover. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/16xy-9h55>.

그 크기와 깊이의 변화는 매년 기상 조건에 의해 크게 좌우된다.

그림 19. 왼쪽: 오존 구멍 영역(millions of km²). 오른쪽: 오존 전량이 220 돕슨 단위 미만인 최소 오존 영역. 2021년은 빨간색으로 표시된다. 최근 연도는 범례에 나타난 대로 비교를 위해 표시된다. 부드럽고 두꺼운 회색 선은 1979-2020년 평균이다. 파란색 음영 영역은 10-90 번째 백분위수를 나타내고 녹색 음영 영역은 1979-2020년의 기간 동안 30-70 번째 백분위수를 나타낸다. 얇은 검은색 선은 1979-2020년 기간의 일일의 대한 최대값과 최소값을 보여준다. 출처: 그림은 NASA Ozone Watch에서 다운로드한 데이터를 기반으로 WMO에서 생성되었다 (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>). NASA 데이터는 OMI 및 TOMS 계의 위성 관측에 기초한다.

2021년 남극 오존 구멍은 비교적 조기에 발달하고 계속 성장하여 크고 깊은 오존 구멍을 형성한다. 오존 구멍은 9월 24일에 2,400만 km²로 확장되었으며 2021년 10월 중순까지도 이 크기에 가까웠다. 오존 구멍의 발달, 그 범위 및 심각도는 2020년과 2018년 시즌 동안 이 크기에 가까웠다. 미국 항공우주국(NASA)의 분석에 따르면 오존 구멍은 2021년 10월 7일에 2,480만 km²의 최대 면적에 도달했으며, 이는 2020년과 2018년의 면적과 유사하고 2015년 2820만 km²와 2006년 2960만 km² 등의 이전 년도에 관측된 최고 값에 가까웠다. 미국 항공우주국(NASA)의 분석에 따른 것이다(그림 19, 왼쪽).

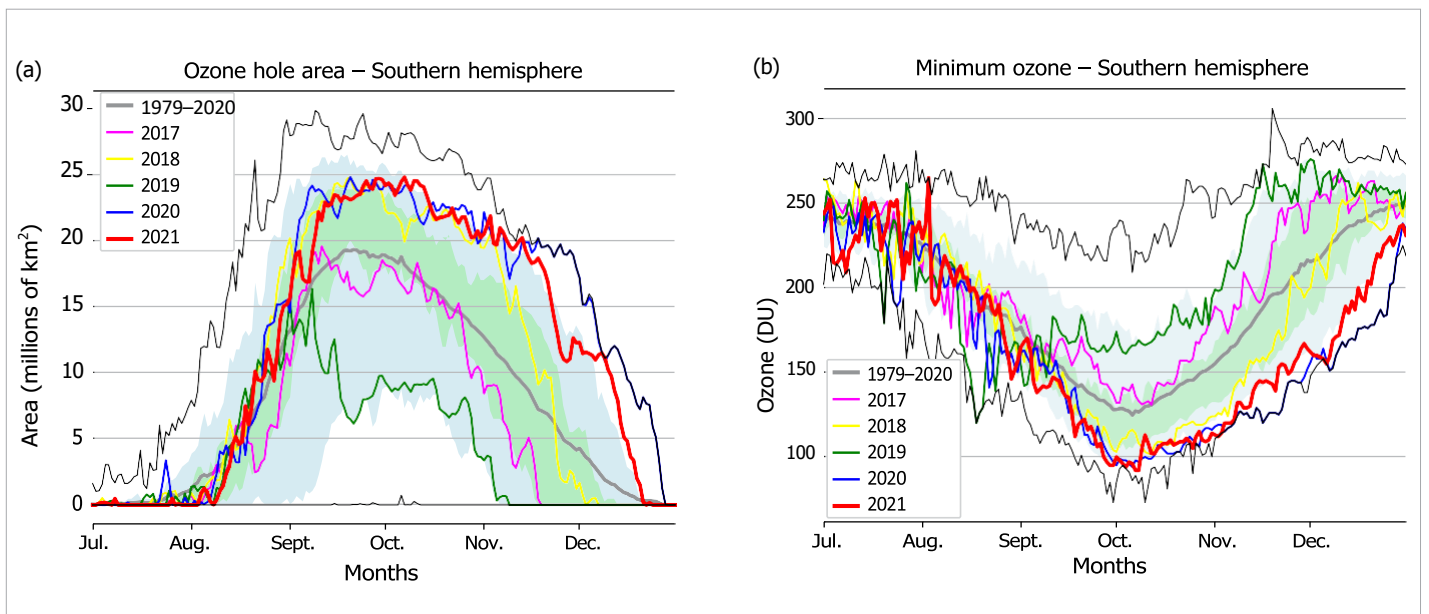
오존 전량 측면에서 NASA는 2021년 10월 7일에 92 DU(돕슨 단위)의 최소 오존을 보고했으며, 이는 2021년 시즌과 지난 17년 동안 가장 낮은 수치였다(그림 19, 오른쪽). 2021년 9월 이후, 성층권의 오존 농도는 남극 대륙의 고도 15-20km에서 거의 0에 가까운 값까지 지속적으로 감소했다. 이는 2020년 시즌과 함께 국립 해양기상청(NOAA)에서 보고한 대로 남극 관측소에서 존데를 통해 측정된 가장 낮은 오존 값 중 일부이다.

2021년 오존 구멍은 1979년 이후 오존 구멍의 70%보다 더 크고 깊었고, 12월 하반기에는 오존 구멍이 닫힐 때까지 그대로 유지되었다. 이는 면적 기준으로 13번째로 큰 오존 구멍으로, 최소 오존 측면에서 6번째로 깊은 오존 구멍이었다. 2021년에 비정상적으로 깊고 큰 오존 구멍은 강력하고 안정적인 극 소용돌이와 성층권에서 2021년 평균보다 더 추운 대기 환경에 의해 주도되었다.

단기 변동성의 동인

중중 기후 패턴 또는 기후 모드라고 하는 다양한 자연 현상이 발생하며 이는 수일에서 수개월에 이르는 기간의 날씨에 영향을 미친다. 표면 온도는 해양에서 비교적 천천히 변하기 때문에 일부 경우 해수면 온도의 반복적인 패턴을 사용하여 계절적 시간대에 따라 육지에서 더 빠르게 변화하는 날씨의 패턴을 이해하고 예측할 수 있다. 이와 유사하게, 더 빠른 속도지만 대기의 알려진 기압 변화는 특정 지역 기상 패턴을 설명하는 데 도움이 될 수 있다.

2021년에는 엘니뇨-남방진동(ENSO), 인도양 다이폴(IOD), 북극진동(AO) 및 남반구 환형모드(SAM)가 각각 세계의 다른 지역의



주요 기상 및 기후 현상에 기여했으며 이는 아래에서 더 자세히 설명한다.

엘니뇨-남방진동

ENSO는 전 세계적으로 기상 패턴의 연도별 변동성의 가장 중요한 동인 중 하나이다. ENSO는 폭우, 홍수 및 가뭄과 같은 자연재해와 관련이 있다. 열대의 태평양 동부의 평균 이상의 해수면 온도와 무역풍의 약화가 특징인 엘니뇨는 일반적으로 지구 온도에 온난화 영향을 미친다. 열대의 태평양 중부와 동부의 평균 이하의 해수면 온도와 강력해진 무역풍이 특징인 라니냐는 엘니뇨와는 반대의 영향을 미친다.

라니냐 현상은 2020년 중반에 나타났고, 10월-12월 기간에 중간 정도의 세기로 정점에 이르렀으며 평균 해수면 온도는 니뇨 3.4 지역(5°N-5°S, 120 °W-170°W)의 1991-2020년 평년치보다 1.3 °C 낮았다. 라니냐는 2021년 상반기 동안 약화되어 해양 및 대기 지표에 따라 5월에 ENSO 중립 상태(평년치의 0.5 °C 이내 온도)에 도달했다. 하지만 해수면 온도는 연중 중반 이후에 냉각되어 7-9월 기간에 다시 라니냐 임계치에 도달했다. 10월-12월 기간까지 평균 해수면 온도는 평년보다 1.0 °C 낮은 적당한 세기에 다시 도달했다.

지구의 세계 온도에 일시적인 냉각 영향을 미치는 것 이외에 라니냐는 동아프리카의 평년보다 건조한 상태와 관련이 있다. 케냐, 에티오피아 그리고 소말리아는 2020년 말, 2021년 초 및 2021년 말에 연속적으로 평균 이하의 강우량이 발생했고, 이로 인해 이 지역에 가뭄이 발생했다. 2021년 초에 강수량은 연초에 해양 대륙⁶¹(기후학적으로 중요한 지역으로, 동남아시아 본토와 호주 사이, 인도양과 태평양 사이의 섬과 바다 지역)에서 평년보다 높았고

파타고니아에서 연초에 평년보다 낮았으며, 이는 라니냐와 관련된 일반적인 패턴이다. 또한 라니냐 현상은 북대서양 지역에서 평균 이상의 허리케인이 발생하게 할 수 있으며, 2021년 허리케인 시즌에 21개의 명명된 열대성 저기압이 발생하게 했다(전체 시즌의 1981-2010년 평균은 14). 라니냐는 또한 미국 남부의 더 따뜻하고 건조한 지역과 관련이 있다. 12월에 이 지역의 대부분의 주는 최고 기온 또는 최고 기온에 가까운 고온이 발생했고, 몇몇 주에서도 평년보다 건조했다.

인도양 다이폴

IOD의 양의 위상은 동부 인도양의 평균 이하의 해수면 온도와 서쪽의 평균 이상의 해수면 온도가 특징이다. 음의 위상은 반대 패턴을 가진다. 전체 해양 분지의 해수면 온도의 변화로 인해 발생하는 변화는 주로 남반구에서 주변 대륙의 날씨에 영향을 미친다. 양의 위상 IOD 현상은 종종 엘니뇨와 관련이 있고 음의 위상 현상은 라니냐와 관련이 있다.⁶²

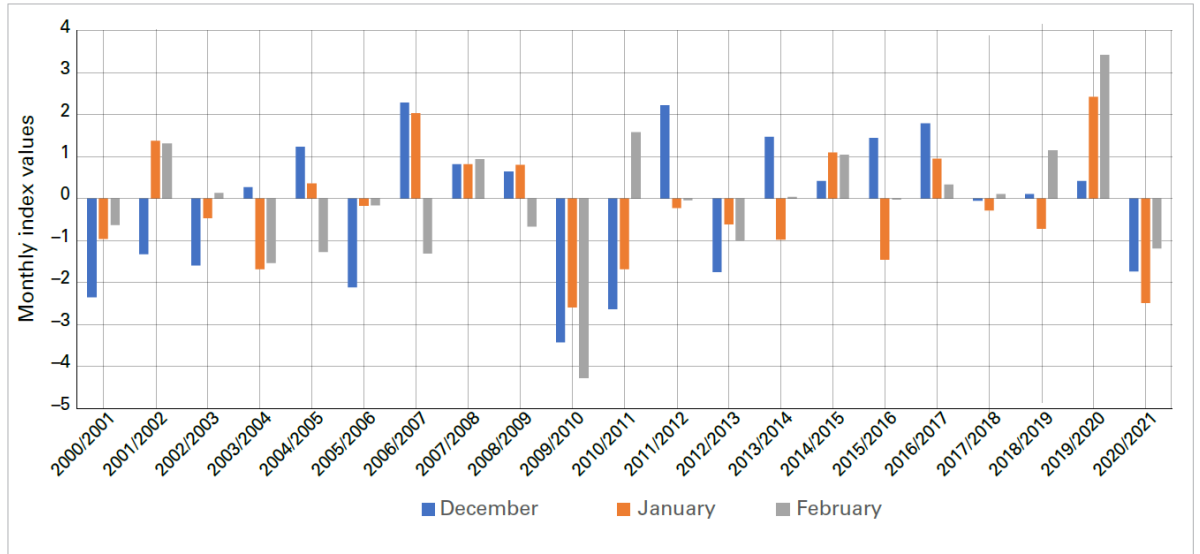
음의 위상 IOD는 2021년 7월에 발생했으며 연말까지 음의 위상 측에 있었지만 중립으로 돌아갔다. 이는 2016년 이후 처음으로 음의 위상 IOD를 기록했다. 라니냐와 함께 이러한 상은 호주의 많은 지역에서 늦은 겨울과 봄에 습한 상태에 기여했다. 서호주 남서부에서 7월 강수량 총계는 1996년 이후 가장 높은 수치가 보고되었고, 남호주의 많은 지역도 마찬가지였다. 호주 전체에서 122년 기록 중 10번째로 습한 봄이 관측되었고, 뉴사우스웨일즈 주는 4번째로 습한 날씨를 기록했다. 11월은 뉴사우스웨일즈와 호주 전체 모두에서 기록이 시작된 이래 가장 습한 11월이었다.⁶³ 이와는 반대로, 다시 라니냐와 함께 음의 위상 IOD가 동부 아프리카의 극심한 건조한 날씨에 기여했을 가능성이 있다.

⁶¹ Ramage, C. S. Role of a Tropical "Maritime Continent" in the Atmospheric Circulation. *Monthly Weather Review* 1968, 96 (6), 365-370. https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/96/6/1520-0493_1968_096_0365_roatmc_2_0_co_2.xml.

⁶² <http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/ln-2010-12/IOD-what.shtml>

⁶³ <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs75.pdf>

그림 20.
2000/2021 년 북반구 겨울철 동안 북극 진동 월별 지수 값. 12 월은 파란색, 1 월은 주황색, 2 월은 회색이다.
출처: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center.



북극 진동

AO는 북반구 전체의 날씨에 영향을 미치는 대규모 대기 패턴이다.⁶⁴ 양의 위상은 북극의 평균보다 낮은 기압과 북태평양과 대서양의 평균보다 높은 기압이 특징이다. 제트 기류는 위도선과 평행하고 평균보다 더 북쪽으로 흐르며 차가운 북극 공기를 차단하고 폭풍은 평소 경로의 북쪽으로 이동할 수 있다. 북아메리카, 유럽, 시베리아 및 동아시아의 중위도 지역은 일반적으로 AO의 음의 위상 동안 평소보다 찬 공기 발생이 더 적다. 음의 위상 AO는 더 예측할 수 없는 제트 기류와 제트 기류가 남쪽으로 떨어지는 중위도 안까지 남쪽으로 흘러내리는 차가운 공기와 관련하여 반대되는 영향을 미친다.

AO는 북반구 2020/2021 겨울 동안 음의 위상이었고, 계절적으로는 2009/2010 겨울 이후 기록상 가장 높은 음의 위상이었다(그림 20). 제트 기류가 북미를 휩쓸어 1994년 이후 대륙에서 가장 추운 2월에 기여했다. 하지만 동일한 파형의 제트 기류가 2021년 2월 북동아시아 일부 지역에서 북쪽으로 밀려나면서

극심한 온난화에 기여했으며 몽골, 중국, 일본 및 한국에서 기록적으로 높은 기온이 보고되었다. 양의 위상 AO(2019/2020년 겨울)와 음의 위상 AO(2020/2021년 겨울)의 대비를 통해 2020년과 2021년 1/4분기의 온도 패턴 차이를 일부 설명할 수 있다. 북극 진동의 음의 겨울 위상은 또한 다음 해 여름에 보다 온건한 북극 해빙 손실과 관련이 있다⁶⁵(북극 해빙 참조).

남반구 환형모드

지구 반대편에 있는 SAM(남극 진동, AAO라고도 함)은 남반구의 날씨에 영향을 미치는 대규모의 대기 패턴이다. SAM은 남극 대륙을 순회하는 서풍 벨트의 남북 이동으로 측정되며 남반구의 중위도에서 고위도까지 발생한다. 양의 위상은 남극 대륙을 향해 줄어드는 강한 서풍 벨트가 특징이고 ENSO의 라니냐 위상과 관련이 있다. 양의 SAM 동안, 북부 반도의 따뜻하고 습한 서쪽 흐름은 동쪽에서 온 온난화와 이례적인 온난화로 이어진다. 이와는 대조적으로, 음의 위상은 적도를 향한 강한 서풍 벨트의 확장이 특징이다.⁶⁶

⁶⁴ Thompson, D. W. J.; Wallace, J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters* 1998, 25 (9), 1297–1300.

⁶⁵ Rigor, I. G.; Wallace, J. M.; Colony, R. L. Response of Sea Ice to the Arctic Oscillation. *Journal of Climate* 2002, 15 (18), 2648–2663. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2).

특히 SAM은 남극 표면 온도, 해양 순환 및 호주 일부 지역의 강우 패턴에 큰 영향을 미칠 수 있다.

SAM은 2021년 내내 주로 양의 수치가었거나 중립적이었고 연초와 연말 모두에서 높은 양의 수치를 보였다.⁶⁷

이러한 양의 패턴은 남극에서 기록적인 추운 호주의 겨울과 4-9월 추운 계절의 원인이 되었을 가능성이 있다. 이는 극지방에서 주로 북동쪽에서 비정상적인 낮은 풍속과 풍향을 생성하고 따뜻한 기단이 이 지역에 도달하는 것을 방지했기 때문이다. 이와는 반대로 남극 반도 북동쪽에 있는 에스페란사 관측소(Esperanza Station)는 평균 기온이 -2.6°C로 기록상 가장 따뜻한 해였다. 12월 18일에 온도는 14.6 °C에 도달했으며 이는 에스페란사 관측소의 12월 내내 최고 기온이었다.

⁶⁶ <http://www.bom.gov.au/climate/sam/>

⁶⁷ <http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html>

2021년의 위험 기상현상

기후의 광범위한 변화를 이해하는 것이 중요하지만 날씨와 기후의 급격한 영향은 폭우와 눈, 가뭄, 폭염, 한파 그리고 열대성 폭풍과 사이클론을 포함한 폭풍과 같은 극단적 기상 현상에서 가장 자주 느껴진다. 이는 홍수, 산사태, 산불 및 눈사태와 같은 다른 큰 영향을 미치는 기상 현상을 일으키거나 악화시킬 수 있다. 이 섹션은 주로 WMO 회원국에서 제공한 자료에 근거한다. 이러한 현상과 관련된 광범위한 사회경제적 위험 및 영향은 **위험 및 영향**에 설명되어 있다.

폭염과 산불

이례적인 폭염은 6월과 7월 동안 여러 번 북아메리카 서부에 영향을 미쳤다. 일부 측정에 따르면 가장 극단적인 폭염은 6월 말에 미국 북서부와 캐나다 서부에서 발생했다. 브리티시 컬럼비아 중남부의 리턴(Lytton)은 6월 29일 49.6 °C에 도달하여 4.6 °C 더 높아져 이전의 캐나다의 기록을 경신했다. 서쪽으로는 밴쿠버 동부 교외와 밴쿠버 섬 내부까지 기온이 40도 중반에 도달했다. 또한 이전에 알려진 북위 50 °N의 최고 기온 보다 5°C 이상 더 높았다. 6월 20일에서 7월 29일 사이에⁶⁸ 대규모의 더위 관련 사망이 발생하였는데 브리티시 컬럼비아에서만 569명이 보고되었고, 앨버타⁶⁹에서는 185명, 그리고 비슷한 기간 동안 미국의 워싱턴주에서는 154명 그리고 오리건 주⁷¹에서 최소 83명이 보고되었다. 오리건 주 포틀랜드(46.7 °C)를 포함하여 많은 장기 관측소에서 기온이 4 °C-6 °C 상승하여 기록을 경신했다. 미국 남서부에도 여러 번의 폭염이 발생했다. 캘리포니아 주의 데스 밸리의 기온은 7월 9일 54.4 °C에 도달하였고, 이는 2020년의 기온과 비슷한 수준으로 최소한 1930년대 이후 세계에서 가장 높은 기온이었다. 그리고 기록상 미대륙의 평균 기록상 가장 더운 여름이었다.

폭염 기간과 그리고 그 이후에 수많은 큰 산불이 발생했다(기록적인 기온 발생한 다음 날 리턴(Lytton) 마을 대부분을 파괴한 산불 포함). 7월 13일에 시작된 북부 캘리포니아의 디시(Dixie) 산불은 10월에 완전히 진압되기 전에 약 390,000 헥타르를 전소시켜 캘리포니아에서 기록된 단일 화재 중 가장 큰 화재였다. 12월 30일 콜로라도의 볼더 동쪽에서 드물게 발생한 겨울 산불로 인해 1,000개 이상의 가옥과 기타 건물이 파괴되거나 피해를 입어 대규모의 재산 손실이 발생했다. 미국에서 이 시즌 동안 불탄 면적은 평균⁷²보다 약간 낮았지만 캐나다에서는 평균보다 훨씬 높았다. 온타리오 주는 기록상 가장 큰 면적이 불탔고, 브리티시 컬럼비아가 세 번째로 큰 면적이 불탔다. 장기간의 매연 공해는 여름 동안 북미의 많은 지역에 영향을 미쳤으며 켈거리는 12시간의 장기 평균과 비교하여 기록적인 512시간의 매연 또는 연무가 보고되었다.

극심한 더위는 북반구 늦여름에 여러 차례 더 넓은 지중해 지역에 영향을 미쳤다. 8월 둘째 주가 가장 많이 더웠다. 8월 11일 이탈리아 시칠리아 시라쿠사 근처의 기상 관측소는 유럽의 잠정 기록인 48.8°C에 도달했으며 카이루안(튀니지)은 50.3°C를 기록했다. 몬토로(47.4°C)는 8월 14일 스페인의 국가 기록을 갱신했고, 같은 날에 마드리드(바라하스 공항)는 42.7°C로 가장 더운 날을 기록했다. 7월 20일, 시즈레(49.1 °C)는 터키의 국가 기록을 갱신했고, 트빌리시(조지아)는 가장 더운 날(40.6°C)을 기록했다. 큰 산불은 많은 지역에서 발생하였고, 특히 알제리, 터키 남부 및 그리스가 심각한 피해를 입었다. 알제리에서 발생한 화재로 40명이 넘는 사망자⁷³가 발생했다. 이 기간 동안 프랑스, 이탈리아, 북마케도니아, 레바논, 이스라엘, 리비아, 튀니지, 모로코에서도 큰 산불이 발생했다.

⁶⁸ <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/life-events/death/coroners-service/news-and-updates/heat-related>

⁶⁹ <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/top-ten-weather-stories/2021.html>

⁷⁰ <https://www.doh.wa.gov/Emergencies/BePreparedBeSafe/SevereWeatherandNaturalDisasters/HotWeatherSafety/HeatWave2021#heading88455>

⁷¹ Oregon Medical Examiner's Office, quoted in media reports, <https://flashalert.net/id/OSPOre/146352>

⁷² <https://www.nifc.gov/>

⁷³ <https://www.emdat.be/>

6월은 동부와 중부 유럽의 많은 지역에서 이례적으로 따뜻했다. 6월에 에스토니아(34.6°C)와 벨로루시(37.1°C)는 국가 기록을 갱신했고, 6월 23일에 상트페테르부르크(35.9°C)와 모스크바(34.8°C), 24일에 예레반(아르메니아, 41.1°C), 26일에 바쿠(아제르바이잔, 40.5°C)에서 기록상 가장 더운 6월을 기록했다. 핀란드의 탐페르(Tampere)는 6월 22일에 기록상 최고 기온(33.2°C)을 보였다. 라트비아는 기록상 가장 더운 6월과 여름을 보였다. 더 멀리 떨어진 리비아에서도 6월 말에 장기간 폭염이 발생했다. 여름 후반에 비정상적인 따뜻함이 북서 유럽에도 도달했고, 7월 21일 캐슬더그(Castlederg)의 31.3°C는 북아일랜드에서는 기록적인 더위였다. 7월에 아일랜드에서 두 번의 열대성 밤이 관측되었으며 케리 주(County Kerry)에서는 일일 최저 기온이 20°C를 초과했다.

3년 연속으로 여름 동안 시베리아, 특히 야쿠츠크(Yakutsk) 주변의 사하 공화국에서 큰 산불이 발생했다. 러시아연방산림청(Federal Forestry Agency)의 보고서에 따르면 여름 말까지 야쿠티아(Yakutia)의 산불 건수는 2,295건이고, 산불 시즌이 시작된 이후 약 890만 헥타르의 면적이 불탔다.

8-9월 성수기 동안 아마존 지역의 산불 활동은 2019년이나 2020년보다 적었지만⁷⁴ 판타날을 비롯한 브라질의 다른 지역에서는 광범위한 산불이 일어났다.

한파와 눈

2월 중순에 비정상적으로 추운 날씨가 미국 중부와 멕시코 북부의 많은 지역에 영향을 미쳤다. 가장 심각한 영향은 일반적으로 적어도 1989년 이후 최저 기온이 발생한 텍사스에 있었으며 일부 지역의 기온은 6-9일 동안 계속 영하에 머물렀다. 2월 16일 오클라호마 시의 기온은 -25.6°C, 델러스는 -18.9°C로 각각 1899년과 1949년 이후 최저기온을 기록했다.

송전이 심각하게 중단되어 이러한 기상 현상이 정점에 달했을 때 약 천만 명에게 영향을 미치는 정전이 발생했다. 동파된 파이프는 손상의 또 다른 주요 원인이었다. 미국에서는 총 226명이 사망자와 약 240억 달러의 경제적 손실이 보고되었고, 이는 미국에서 기록상 가장 큰 피해를 입힌 겨울 폭풍이 되었다.⁷⁵

2020/2021 겨울은 북아시아의 많은 지역에서 추운 겨울이었다. 러시아 연방은 2009/2010년 이후 가장 추운 겨울을 보냈다. 평균 이하의 기온은 12월 말과 1월 초에 일본의 많은 지역에 영향을 미쳤으며 여러 차례 폭설이 내렸다. 혼슈 동해 연안의 여러 지역은 1월 초에 기록상 가장 많은 72시간의 강설량을 보였다. 이 기간 동안 중국 대부분의 지역 또한 비정상적으로 추웠으며 베이징의 기온은 1월 7일에 -19.6°C에 도달하여 1966년 이후 최저 기온을 기록했다.

1월 7일부터 10일까지 스페인의 많은 지역에 심한 눈보라가 몰아쳤고 그 이후 일주일 동안 기온이 영하로 떨어졌다. 레티로(마드리드)의 중심 도시 지역에 총 53cm의 눈이 내렸고 스페인의 다른 많은 지역에서도 폭설이 보고되었다.⁷⁶ 툴레도(-13.4°C)와 테루엘(-21.0°C)을 비롯한 일부 지역은 폭풍의 여파로 1월 12일에 기록상 최저 기온을 기록했다. 육상 및 항공 운송에 큰 지장이 있었다. 겨울 후반인 2월 둘째 주에 네덜란드에는 2010년 이후 가장 큰 눈보라를 내렸고, 독일, 폴란드, 영국에도 폭설이 내렸다. 폭풍의 여파로 브래머(Braemar)는 2월 12일에 -23.0°C를 기록했고, 이는 1995년 이후 영국에서 최저 온도였다. 남동부 유럽에서는 아테네에 2009년 2월 15일 이후 가장 많은 눈이 내렸다. 리비아는 2월 15일에서 21일 사이에 비정상적인 강설이 내렸고, 12월 말에는 고지대에 다시 강설이 내렸다.

4월 초에 비정상적인 봄 추위가 유럽의 많은 지역에 영향을 미쳤다. 프랑스의 4월 최저

⁷⁴ https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/

⁷⁵ <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/2021>

⁷⁶ http://www.aemet.es/en/conocermas/borrascas/2020-2021/estudios_e_impactos/filomena

기온은 8일 생테티엔(Saint-Etienne) 에서 -7.4°C, 6일 보베(Beuvais)에서 -6.9°C를 기록했고, 베오그라드(세르비아)는 7일에 기록상 가장 많은 4월 강설량을 기록했다. 이는 21세기 폴란드에서 가장 추운 4월이었다. 높은 고도에서 4월의 국가 기록이 스위스(융프라우에서 -26.3°C)와 슬로베니아(기상 관측소 Nova vas na Blokah에서 -20.6 °C)에서 세워졌다. 이는 프랑스에서 3월 31일에 기록상 가장 따뜻한 3월을 기록하면서 3월까지 매우 따뜻한 날씨로 이어졌다. 농업의 서리 피해는 광범위하고 심각했으며 프랑스에서만 포도원과 기타 작물의 손실이 미화 46억 달러를 초과했다. 영국의 4월 월평균 기온은 1922년 이후 최저치를 기록했다.

강수

기온과 비교하여 강수량은 더 높은 공간적/시간적 변동성이 특징이다. 2021년에 선택된 기후 기간(1951-2000년)을 기준으로 총 강수량이 평년 이상인 지역은 동유럽, 동남아시아, 해양 대륙, 남미 북부 지역 및 북미 남동 일부 지역이었다(그림 21). 강수량이 적은 대규모 지역에는 서남 아시아와 중동,

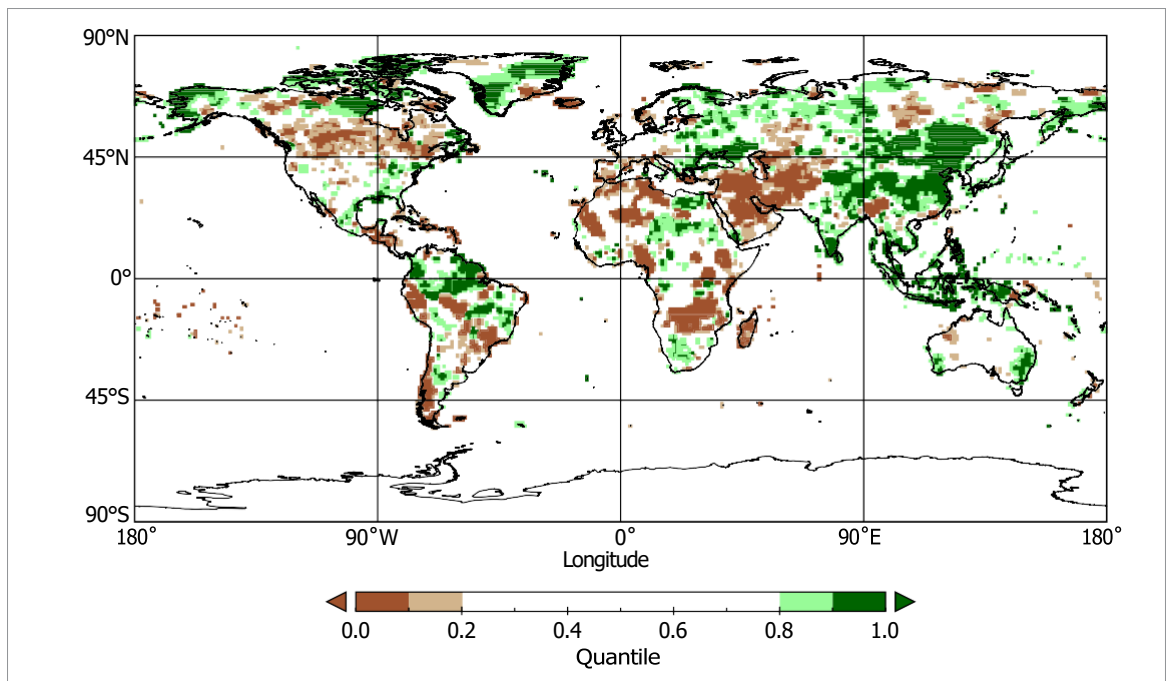
남아프리카 일부, 남아메리카 남부 일부 및 북아메리카 중부 지역이 포함된다.

서아프리카 몬순의 시작은 지연되었다. 시즌 후반에는 특히 서부 몬순 지역에서 총 강수량이 평년보다 많았다. 전체적으로 계절적 강수량은 평년에 가까웠다. 남아프리카의 잠비아를 중심으로 한 지역에서는 5월까지 우기 동안의 강수량이 장기 평균 이하였다. 적어도 2년 연속 마다가스카르의 강수량이 정상 이하였고, 총 강수량은 2011년 이후 대부분 평균 이하였다. 또한 우기(4월-5월 및 10월-11월) 에도 아프리카의 빨 지역은 평년보다 건조했다.

평균 이상의 총 강수량은 알래스카와 캐나다 북부, 미국 남동부 및 카리브해 일부 지역에서 관측되었다. 이 두 개의 평년보다 더 습한 밴드 사이에서는 해당 대륙을 가로질러 광범위하게 비정상적으로 건조한 상태가 지속되었다.

조사 기간에 비해 비정상적으로 높은 강수량이 호주 남서부와 남동부에서 기록되었다. 한편, 뉴질랜드의 북쪽 섬에서는 비정상적으로 적은 강수량이 기록되었다.

그림 21. 1951-2010 참조 기간 대비 백분율로 표시한 2021년 총 강수량으로, 가장 건조한 지역 20%(갈색)와 가장 습한 지역 20%(녹색), 갈색과 녹색의 길은 음영은 가장 건조한 10%와 가장 습한 10%를 나타냄.
출처: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), Deutscher Wetterdienst, Germany.



비정상적으로 적은 강수량이 지중해 주변 지역에 내렸고, 흑해 주변과 동유럽 일부 지역에서는 비정상적으로 많은 강수량이 감지되었다.

홍수

7월 17일부터 21일까지 태풍 *인파(In-fa)*에 앞서 수분 유입으로 강화된 폭우가 중국 중부의 해난성을 강타했다. 가장 심각한 피해를 입은 지역은 정저우 시(해난성 성도)의 주변으로, 7월 20일에는 1시간 동안 201.9mm(중국 국가 기록), 6시간 동안 382mm의 강우량을 기록했다. 전체적으로 이 지역에는 720mm의 비가 내렸으며, 이는 연평균 보다 많았다. 정저우 시에서는 많은 건물, 도로 및 지하철이 침수되는 극심한 돌발 홍수가 발생했다. 이 홍수로 380명이 사망 또는 실종되었고, 177억 달러의 경제적 손실이 보고되었다.⁷⁷ 그리고 10월 초에 산시성과 허베이 성에 집중적으로 늦은 계절성 홍수가 발생했다.

서유럽에서는 7월 중순에 기록상 가장 심각한 홍수가 발생했다. 홍수의 가장 큰 영향을 받은 지역은 독일 서부와 벨기에 동부로, 7월 14-15일에 넓은 지역에 100-150mm의 비가 지난 번의 높은 강수량 이후 이미 비정상적으로 젖어 있는 땅에 떨어졌다. 독일의 하겐(Hagen)은 22시간 동안 241mm의 강우량을 보고했다. 수많은 강이 극심한 홍수를 겪었고 여러 마을이 침수되었으며 여러 번의 산사태가 발생했다. 프랑스, 네덜란드, 룩셈부르크, 스위스 또한 심각한 홍수를 겪었다. 보고된 사망자 수는 독일 183명, 벨기에 36명으로 독일의 경제적 손실은 200억 달러를 넘어섰다.⁷⁸

3월 중순에 계속된 폭우로 인해 호주의 뉴사우스웨일즈 동부 지역에 큰 홍수가 발생했다.⁷⁹

3월 18일부터 24일까지 1주일은 뉴사우스웨일즈 해안 지역을 평균적으로 봤을 때 가장 습한 1주였다. 가장 심각한 홍수는 시드니 북쪽의 Hastings, Karuah 및 Manning 강을 따라 발생했지만 시드니 서부 일부를 포함한 다른 지역에서도 큰 홍수가 발생했다. 또한 많은 내륙의 강에 홍수가 발생하여 2017-2019년 가뭄으로 심각하게 고갈된 저수량이 많이 회복되었다. 그리고 최소 21억 달러의 경제적 손실이 보고되었다.

2021년 아프가니스탄, 서쪽 헤라트 주변 그리고 7월 28-29일 동쪽 누리스탄을 중심으로 국지적 집중호우와 관련된 두 번의 돌발 홍수가 발생했다. 두 기상 현상 모두 5월에 61명이 사망하고 7월에 113명이 사망하는 등 상당한 인명 손실이 있었다.⁸⁰

돌발 홍수는 지중해와 흑해 연안 주변에서 여러 차례 발생했다. 가장 강력한 기상 현상은 8월 10일 터키의 흑해 연안에서 발생했으며 여러 마을이 심각한 피해를 입었고 77명이 사망했다. 399.9mm의 강우량이 24시간 동안 보즈쿠르트(Bozkurt)에서 기록되었다. 이러한 기상 현상은 흑해에서 열대성 폭풍의 특성을 가지고 있음에도 불구하고 열대 밖에서 형성되는 폭풍인 "메디케인"과 관련이 있다. 8월 12일부터 14일까지 러시아연방의 흑해 연안에서도 극심한 강우와 홍수가 보고되었다.

10월 4일, 리구리아(이탈리아 북서부)의 해안 지역에는 Montenotte Inferiore에서 6시간 동안 496.0mm 그리고 Rossiglione에서 12시간 동안 740.6mm를 비롯하여 이례적인 강우량이 내렸다.

올해 상반기에 남아메리카 북부의 일부 지역, 특히 북부 아마존 유역에 지속적으로 평균 이상의 강우가 내리면서 이 지역에 심각하고 오래 지속되는 홍수가 발생했다. 마나우스(브라질)의 리오 네그로(Rio Negro)는 6월 20일 30.02m로 최고 기록을 갱신했다.⁸¹

⁷⁷ RM 114.3 billion, from China's national contribution

⁷⁸ National contribution, Germany

⁷⁹ <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs74.pdf?20210621>

⁸⁰ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000050-afg>

⁸¹ http://www.cprm.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20211022_11-20211025%20-%20114229.pdf

가장 광범위한 홍수는 브라질 북부에서 보고되었지만 가이아나, 베네수엘라 볼리바리아 공화국, 콜롬비아 또한 영향을 받았다.

인도 몬순의 진행과 사라짐은 지연되었지만 전반적인 인도 몬순 강수량은 평균에 가까웠고, 서쪽의 평균 이상 강수량은 북동부의 평균 이하 값에 의해 상쇄되었다. 시즌 동안 인도에서 529명, 파키스탄에서 198명(9월 30일 기준)이 홍수로 사망했으며 방글라데시와 네팔에서 추가 사망자가 발생했다.⁸² 10월과 11월 북동 몬순 시즌 동안 인도 동부와 네팔에 또 다른 홍수가 발생했다. 동부 아시아에서 중국 동부(허난 제외)는 2020년보다 몬순 시즌 동안 일반적으로 덜 습했지만 일본은 8월에 매우 습했다. 일본 서부는 기록상 가장 습한 8월을 경험했고⁸³ 일부 지역은 8월 11일과 26일 사이에 1400 mm 이상의 비가 내렸다. 12월 16일 열대 저기압이 말레이시아에 상륙하여 셀랑고르와 쿠알라룸푸르에 심각한 홍수를 일으켜 최소 52명이 사망한 것으로 보고되었다. 쿠알라룸푸르 국제공항에서는 12월 17-18일에 12시간 동안 230mm의 비가 쏟아졌다.⁸⁴

아프리카 사헬의 우기는 일반적으로 평균(1951-2000)에 가까웠고 최근 몇 년보다 덜 습했지만 특히 니제르, 수단, 남수단과 말리에서 여전히 상당한 홍수가 보고되었다. 아프리카의 다른 곳에서 탕가니카(Tanganyika) 호수는 5월에 정상 수위보다 3 m 이상 높아져⁸⁵ 부룬디의 호수가 주민들이 집을 잃었다. 그리고 빅토리아 호수는 1992년 위성 데이터가 시작된 이후 최고 수위로 상승하여 전년도의 최고치를 넘어섰다. 2020년 홍수로 인해 발생한 많은 양의 고인 물과 더불어 빅토리아 호수의 나일강 하류의 높은 유량으로 2021년에 거의 정상적인 강수량에도 불구하고 남수단과

수단 일부 지역에서 계속해서 홍수가 발생했다. 대부분 장기간의 가뭄을 겪었던 남아프리카에서 2020/2021 우기 동안의 강수량은 남아프리카 북부와 짐바브웨를 비롯한 일부 지역에서 평균 이상이었고, 일부 홍수가 보고되었지만 북부에서는 평균에 가깝거나 평균보다 낮았다.

캐나다 서부는 11월에 심각한 홍수로 피해를 입었다. 브리티시 컬럼비아 남부의 여러 지역에서 60시간 동안 200-300mm의 비가 내렸고 홍수와 산사태가 발생했다(일부 경우에는 화재가 발생한 지역의 유기수 때문에 더욱 악화되기도 함). 밴쿠버와 캐나다의 나머지 지역을 연결하는 대부분의 주요 경로가 몇 주 동안 폐쇄되어 몇몇 지역사회가 부분적으로 또는 전체적으로 침수되어 교통이 심각하게 중단되었다. 6명의 사망자가 보고되었으며 경제적 손실은 20억 캐나다 달러를 초과했다. 이 홍수는 또한 미국 북서부의 인접 지역에 영향을 미쳤다. 시애틀과 밴쿠버 모두 기록상 가장 습한 가을을 보냈다.

가뭄

심각한 가뭄이 2년 연속 아열대 남아메리카의 많은 지역에 영향을 미쳤다. 강수량은 브라질의⁸⁶ 중부와 남부, 파라과이, 우루과이, 아르헨티나 북부의 많은 지역에서 평균보다 훨씬 낮았다. 이 가뭄은 심각한 농업 손실로 이어졌고, 7월 말에 발생한 한파로 인해 더욱 악화되었으며 이 기간 동안 브라질 남부의 높은 지역에서 5일 연속 최고 기온이 10 °C 미만이었고 브라질의 많은 커피 재배 지역이 피해를 입었다. 낮은 강 수위 또한 수력 발전 생산량⁸⁷을 감소시켰고 하천 수송을 방해했다. 브라질 정부는 파라나(Paraná) 수로 지역에서 수자원의 심각한 부족 상황을 선언했고, 수많은 물 저장고가 지난 20년 동안 최저 수준 또는 거의 최저 수준에 이르렀다.⁸⁸

⁸² National contributions of India and Pakistan; EM-DAT has 120 deaths in Nepal over two incidents and 21 in Bangladesh from one

⁸³ https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/news/press_20210924.pdf

⁸⁴ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000209-mys>

⁸⁵ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000039-bdi>

⁸⁶ <https://clima.inmet.gov.br/prec>

⁸⁷ <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210707-escassez-hidrica-2021.aspx>

이 지역의 24개월 표준 강수 지수(SPI)는 1960년대 이후 최저 수준에 도달했다. 아순시온에 있는 파라과이 강은 10월 6일 기준 수위에서 0.75m 아래로 떨어졌으며, 이는 2020년에 설정된 이전 기록보다 0.21m 낮았다. 지난 10년 동안 장기간 가뭄이 지속된 칠레에서는 2021년 또한 건조한 해였으며 대부분의 지역에서 평균보다 최소 30% 낮은 강우량을 기록했다. 콘셉시온(559.2mm), 발디비아(949.0mm), 푸에르토 몬트(921.7mm)를 비롯한 산티아고 남쪽의 여러 지역에서 2021년에 기록상 가장 건조한 해였고, 전체 기온은 평년보다 40-50% 낮았다.

2020년에 시작된 북미 서부 지역의 광범위한 가뭄이 2021년에 확산 및 심화되었다. 9월에 들어서자 7월부터 남서 내륙 일부 지역에서 활동력이 있는 여름 몬순으로 인해 약간 완화되었음에도 불구하고 미국 대부분 지역과 로키 산맥 서부에 극심한 가뭄이 발생했다. 극한의 이례적인 가뭄 또한 미국-캐나다 국경의 양쪽에서 동쪽으로 확장되어 동쪽의 미네소타와 캐나다의 프레리 지역과 같은 북쪽 국경 주에 영향을 미쳤다. 2020년 1월부터 2021년 8월까지 20개월은 미국 남서부⁸⁹에서 기록상 가장 건조했으며 강수량은 이전 기록보다 10% 이상 낮았다. 2021년 캐나다의 예측된 밀 및 캐놀라 작물 생산량은 2020년 수준⁹⁰보다 35%-40% 낮았으며, 미국에서는 콜로라도 강의 미드 호수 수위가 저수지가 완전히 가동된 이후 7월에 기록상 최저 수준으로 만수위보다 47m 아래로 떨어졌다. 캘리포니아의 가뭄 상황은 10월 말과 12월에 내린 폭우로 완화되었다. 새크라멘토는 10월 24일에 내린 138mm로 강수량조차 측정할 수 없는 기록적인 211일 기간이 끝난지 불과 며칠 만에 기록상 가장 습한 날을 기록했지만

가뭄은 멀리 서부 해안에서 계속되었고 해가 끝날 무렵 미국의 중남부를 관통하여 동쪽으로 더 확장되었다.

심각한 가뭄은 2021년 동안 서남 아시아의 넓은 지역에 영향을 미쳤다. 이란, 아프가니스탄, 파키스탄, 터키 남동부, 투르크메니스탄 대부분을 포함한 지역에서 2020/2021의 차가운 계절 동안 평균보다 훨씬 낮은 강수량이 떨어졌다. 파키스탄은 기록상 세 번째로 건조한 2월과 5번째로 건조한 1-3월을 기록했다. 산악의 눈덩이로 뒤덮인 들판 또한 평균보다 훨씬 낮았으며, 이란의 적설 범위는 1월과 2월 대부분의 장기 평균의 절반 정도였고, 이로 인해 눈이 녹으면서 강의 유량이 감소하고 관개용 물 가용성이 감소했다.

가뭄은 연중 내내 3회 연속 평균 이하의 우기 이후 특히 소말리아, 케냐, 에티오피아 일부 지역에 영향을 미친 아프리카의 뿔 지역에서 발생했다. 시즌 후반에 케냐에 약간의 비가 내렸음에도 불구하고 특히 10-12월 우기에 비가 거의 내리지 않았다.

적어도 2년 동안 지속된 심각한 가뭄이 마다가스카르 남부에 계속해서 영향을 미치고 있다.⁹¹ 2020년 7월부터 2021년 6월까지 12개월 동안 강수량은 해당 지역의 평년보다 약 50% 낮았다. 이 지역에는 심각한 식량 안보 문제가 있었고, 2021년 8월 기준으로 114만 명이 세계식량계획에 의해 긴급 지원이 필요한 것으로 분류되었다.⁹²

열대 사이클론

2021년 전 세계 열대성 사이클론 활동은 평균에 가까웠다(1981-2010년). 2년 연속으로 북대서양은 1981-2010년 평균인 14개를

⁸⁸ <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-declara-situacao-de-escassez-quantitativa-dos-recursos-hidricos-da-regiao-hidrografica-do-parana>

⁸⁹ <https://www.drought.gov/news/new-noaa-report-exceptional-southwest-drought-exacerbated-human-caused-warming>

⁹⁰ <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/210914/dq210914b-eng.htm>

⁹¹ <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/cb7310en.pdf>

⁹² <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WFP%20Madagascar%20Country%20Brief%20-%20August%202021.pdf>

훨씬 웃도는 21개의 명명된 폭풍으로 매우 활동적인 시즌을 보냈다. 북인도양에서도 활동적인 계절이었지만 북태평양 서부와 북태평양 동부에서는 활동량이 평균에 가까웠거나 평균보다 낮았다. 2020/2021 남반구 시즌 또한 태평양과 인도양 모두에서 평균보다 약간 낮았다.

북대서양 시즌의 가장 중요한 허리케인은 *이다*(*Ida*)였다. *이다*는 8월 29일 루이지애나(미국)에서 1분 동안 지속된 지속 240km의 바람으로 카테고리 4 시스템으로 상륙했으며, 이는 막대한 바람 피해와 폭풍 해일 범람으로 기록상 주에서 가장 강한 허리케인 상륙이었다. 그 후 카테고리 4 시스템은 특히 뉴욕 지역에서 대규모의 홍수가 발생한 육지의 북동쪽 트랙에서 계속되었다. 2주 전에 발생한 허리케인 *헨리*(*Henri*)로 인해 발생한 홍수를 경험한 뉴욕은 시간당 강수량이 기록적인 80 mm였고, 24시간 동안 총 강수량은 도시 일부에서 200 mm를 초과했다. 열대성 저기압으로 발달하기 전에 *이다*의 전조 시스템은 또한 베네수엘라에 심각한 홍수를 일으켰다. 미국과 베네수엘라에서 발생한 총 72명의 사망자는 *이다*가 직접적인 원인이었고, 43명이 *이다*의 간접적인 영향으로 사망했으며 미국의 경제적 손실은 미화 750억 달러로 추산된다.⁹³ 시즌 동안 상륙한 또 다른 중요한 허리케인은 *그레이스*(*Grace*)로, 베라크루스(멕시코)를 카테고리 3 허리케인으로 강타했으며, 이전에는 주로 홍수로 인해 아이티(지진 후 복구가 지연된 곳), 도미니카 공화국, 자메이카 그리고 트리니다드토바고에 영향을 미쳤다.

남반구에서 2021년의 가장 중요한 사이클론⁹⁴은 4월에 발생한 *세로자*(*Seroja*)였다. *세로자*는 인도네시아 남쪽에서 형성되어 남동쪽으로 호주 서부 방향으로 이동했다. *세로자*는 4월 11일 칼바리 근처에 (호주) 카테고리 3 사이클론으로 상륙했으며, 이는 1956년 이래 지금까지 호주 서부의 남쪽에서 발생한 가장 강력한 사이클론 상륙이었다. *세로자*의 가장 심각한 영향은 홍수와

동티모르의 전조 시스템과 동 누사텡가라(East Nusa Tenggara)의 인도네시아 지역의 산사태로 인한 것이었다. 쿠팡(티모르)은 4월 2일-5일의 4일 동안 700.4mm의 강우량을 기록했다. 총 226명의 사망자가 *세로자*와 관련이 있고, 인도네시아 181명, 동티모르 44명, 호주 1명이었다.⁹⁵ 1월에 *엘로이즈*(*Eloise*)는 남아프리카 홍수의 원인이 되었고, 모잠비크, 남아프리카, 짐바브웨, 에스와티니 및 마다가스카르에서 피해와 사상자가 보고되었고, 남태평양에서는 *아나*(*Ana*)와 *니란*(*Niran*)이 각각 피지와 뉴칼레도니아에서 홍수와 정전을 일으켰다.

북인도양 시즌의 가장 심각한 사이클론은 *타우크태*(*Tauktae*)이었고, 인도 서해안의 북쪽까지 이동했고 최고 강도에 약간 못 미치는 강도로 최고 3분 동안 초당 50-53 m의 풍속⁹⁶이 지속되었고, 이는 구자라트에서 알려진 가장 강한 사이클론 상륙과도 동일하다. 적어도 144명이 인도에서 그리고 4명이 파키스탄에서 사망한 것으로 보고되었다.⁹⁷ 시즌 후반에 사이클론 *굴라브*(*Gulab*)이 9월 말에 벵골 만에서 인도의 동부 해안을 건넜었다. 나머지 시스템은 아라비아 해에서 출현하고 다시 강력해지기 전에 인도를 건너와 *샤흐인*(*Shaheen*)으로 이름이 변경되었다. *샤흐인*은 10월 3일 무스카트 북서쪽 오만 북부 해안에 상륙했으며, 1890년 이후 이 지역에 상륙한 첫 사이클론이다. 알 수와이크(Al Suwaiq)는 24시간 만에 294mm의 강우량을 기록했으며 이는 이 지역 연간 평균의 약 3배이다. 인도, 파키스탄, 오만, 이란에서 주로 홍수로 총 39명이 사망한 것으로 보고되었다.

북서태평양에서 시즌의 가장 중요한 열대성 사이클론은 12월 16일 필리핀 중심부를 횡단한 태풍 *라이*(*오렛*)로, 상륙 전에 빠르게 강력해진 후 915 hPa의 최소 중심 기압으로 거의 최고 강도로 상륙했다. 태풍 *라이*는 남중국해에 진입한 후

⁹³ <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/2021>

⁹⁴ Tropical Cyclone Yasa (December 2020) forms part of 2020/2021 seasonal statistics but was reported on in the 2020 State of the Climate.

⁹⁵ <https://reliefweb.int/disaster/tc-2021-000033-idn>

⁹⁶ https://rsmcnewdelhi.imd.gov.in/uploads/report/26/26_e0cc1a_Preliminary%20Report%20on%20ESCS%20TAUKTAE-19july.pdf

⁹⁷ From national contributions

12월 18일에 다시 강력해졌다가 더 이상 상륙하지 않고 약화되었다가 소멸되었다. 필리핀 전역에서 심각한 피해가 발생하여 최소 406명이 사망하고 베트남에서도 홍수가 발생했다. 다른 몇몇 중요한 태풍이 상륙했으며, 특히 바탄 제도(필리핀)의 태풍 찬투(*Chanthu*)가 가장 두드러졌다. 7월에 발생한 찬투와 태풍 인파 또한 상하이 주변의 홍수와 선박 차질의 원인이 되었고, 태풍 덴무(*Dianmu*)는 베트남에 상륙한 후 9월에 태국에 홍수를 발생시켰다.

6명의 사망자와 18억 달러의 경제적 손실이 보고되었다. 2021년 12월 동안 193개의 토네이도 보고가 확인되었고, 이는 1991-2010년 12월 평균인 24개의 약 8배이다. 이 수치는 2002년의 이전 기록(97건)의 두 배이다. 12월 10일에는 93명이 사망하고 39억 달러의 경제적 손실이 보고된 역사적인 토네이도가 남동부와 중부 여러 주에서 발생했다. 이는 1953년 12월 5일 발생한 미시시피 빅스버그에서 발생한 토네이도를 능가하는 미국에서 12월 발생한 가장 치명적인 토네이도로, 38명의 사망자가 발생했다. 4월 27-28일 텍사스와 오클라호마에서 발생한 우박으로 인해 33억 달러의 손실이 발생했다.

강한 폭풍

6월 하반기와 7월에 서부 및 중부 유럽에서 여러 차례 심한 뇌우가 발생했다. 6월 24일 F4 토네이도⁹⁸가 모라비아 남부의 여러 마을을 강타하여 큰 피해와 6명의 사망자가 보고되었다. 이는 체코에서 기록된 가장 강력한 토네이도였다. 6월 동안 벨기에, 프랑스 그리고 폴란드에서도 토네이도가 보고되었다. 체코, 슬로바키아, 스위스, 독일을 비롯하여 여러 국가에서 큰 우박(6-8cm의 직경)이 보고되었다. 체코에서만 약 7억 달러의 손실이 발생했다.

미국에서는 2021년 동안 1,376개의 토네이도가 보고되었고, 이는 1991-2010년 평균보다 높은 수치이다. 3월 25일 남동부를 강타한 심각한 토네이도가 알라바마와 서부 조지아에 가장 심각한 영향을 미쳤다.

원인규명

개별적인 극한 기후 현상의 원인규명은 전문가의 의견검토를 완료해야 하기 때문에 종종 몇 개월이 걸릴 수 있다. 그러나 전문가의 의견검토 방법을 사용하여 기상 기록이 깨진 후 단 며칠 만에 결론에 도달하는 거의 실시간에 가까운 원인규명 평가를 수행하는 것이 점점 더 가능해지고 있다. 이러한 "신속한 원인규명" 연구는 6월과 7월^{99,100,101}에 북미 서부의 폭염에 대해 그리고 7월¹⁰²에 서유럽과 11월¹⁰³에 브리티시 컬럼비아에서 발생한 홍수에 대해 수행되었다. 북미 서부 폭염에 관한 연구에 따르면 오늘날의 기후에서는 이러한 폭염은 드물지만 기후 변화가 없었다면 이러한 폭염은 거의 발생하지 않았을 것이다.

⁹⁸ On both the Fujita scale and the Enhanced Fujita scale, a tornado that causes devastating damage is classified as category 4 tornado (F4 and EF4 respectively). The scales differ in the wind speeds thought to be associated with "devastating damage", with lower wind speeds assumed in the enhanced system for the same level of damage.

⁹⁹ <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>

¹⁰⁰ Philip, S. Y.; Kew, S. F.; van Oldenborgh, G. J. et al. Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. *Earth System Dynamics Discussions*, In review, 1-34. Preprint: <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.

¹⁰¹ Christidis N., 2021. *Using CMIP6 Multi-model Ensembles for Near Real-time Attribution of Extreme Events*; Hadley Centre Technical Notes 107. United Kingdom Met Office Hadley Centre: Exeter, 2021. https://digital.nmla.metoffice.gov.uk/IO_e2e76d02-d72e-49d6-8419-728fb313d075/; <https://blog.metoffice.gov.uk/2021/06/29/heatwave-record-for-pacific-north-west/>

¹⁰² <https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/>

¹⁰³ Gillett, N.; Cannon, A.; Malinina, E. et al. *Human Influence on the 2021 British Columbia Floods*; SSRN Scholarly Paper ID 4025205; Social Science Research Network: Rochester, 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4025205>.

서유럽 홍수의 경우, 신속한 원인규명 연구에서 해당 기상 현상의 규모에서는 극한 강수의 경향을 감지하는 것이 어렵고 수분이 포화된 토양과 지역 수문학 또한 이 기상 현상의 요인임을 밝혀졌다. 하지만 서유럽의 더 넓은 지역에서 극한 강수의 유의미한 경향이 발견되었고, 연구는 이 더 넓은 지역에서 인간에 의해 초래된 기후 변화가 발생한 것과 유사한 극한 강수 현상의 가능성을 증가시켰다고 결론내렸다.

더 일반적으로 이와 같은 기상 현상은 더 넓은 변화의 패턴에 들어 맞는다. IPCC는 북미 서부와 북미 북서 지역의 극한 고온 현상이 증가했으며 이러한 온도 증가가 인간에 의해 초래되었다는 사실은 어느 정도 믿을 수 있다고 평가했다.¹⁰⁴ 이와 유사하게 IPCC는 홍수의 영향을 받은 서부 및 중부 유럽 지역에서 호우가 증가했지만 이러한 기상 변화에 미치는 인간의 영향은 현재 거의 없다고 평가했다.

¹⁰⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

위험 및 영향

기후 관련 영향의 위험은 기후 관련 위험요인 그리고 인간 및 자연 시스템의 취약성, 노출 및 적응 능력 간의 복잡한 상호 작용에 따라 다르다. 기후 관련 현상은 인간안보, 인간 이동성, 생계, 경제, 기반시설 및 생물 다양성뿐만 아니라 보건, 식량 및 물 안보에 미치는 영향을 통해 사회에 인도주의적 위험을 제기한다. 기후 및 기상 이변 현상은 또한 지역과 국가내 천연 자원의 사용 및 분배에 영향을 미치며 환경에 막대한 부정적인 영향을 미친다. 이러한 부정적인 환경 영향에는 가뭄, 산림 및 이탄 지대 지역의 산불, 토지 황폐화, 모래 및 먼지 폭풍, 사막화, 홍수 및 해안 침식과 같은 토지에 미치는 영향이 포함된다. 전 세계 온실 가스 배출량의 현재 수준에서 세계는 산업화 이전 수준보다 1.5 °C 또는 2 °C 높은 합의된 온도 임계값을 초과하는 과정을 지속하고 있고, 이는 이미 발생하고 있는 것 이상으로 만연한 기후 변화 영향의 위험을 증가시킬 것이다.

식량 안보

2021년 세계 식량 안보 전망

COVID-19 펜데믹으로 더욱 악화된 분쟁, 이상 기상 현상 및 경제적 충격의 복합적인 영향으로 인해 기아가 증가하고 식량안전보장을 개선하기 위한 수십 년의 진전이 약화되었다(그림 22). 2021년에 인도주의적 위기가 심화되면서 기근 위험에 처한 국가의 수도 증가했다. 2020년 전체 영양실조 인구 중 절반 이상이 아시아(4억 1,800만 명), 3분의 1이 아프리카(2억 8,200만 명)에 살고 있다. 2020년(7억 6,800만 명), 영양실조가 정점에 달한 후 2021년에는 세계 기아 인구수는 약 7억 1,000만 명(세계 인구의 9%)으로 감소할 것으로 예상된다.¹⁰⁵ 하지만 2021년 10월 현재 많은 국가의 수치가 이미 2020년보다 높았다. 이러한 현저한 증가는 이미 식량 위기

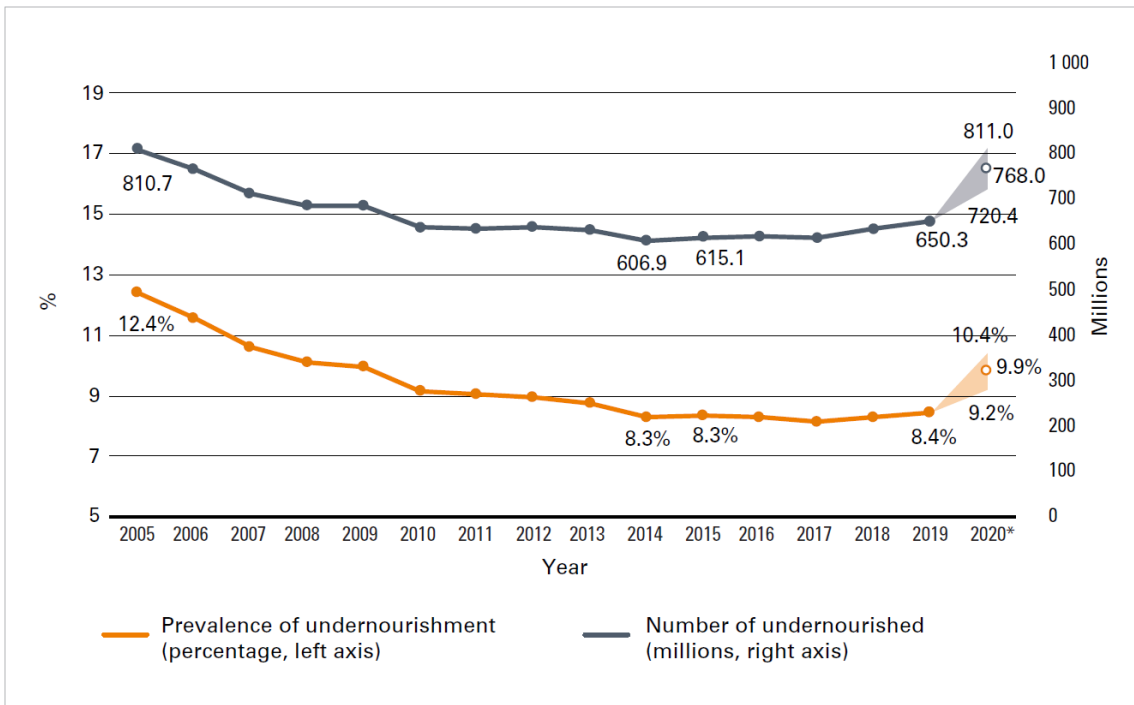


그림 22. 세계에서 영양실조로 고생하는 사람들의 수는 COVID-19 동안 2019년 6억 5천만명에서 2020년 7억 6800만으로 현저히 증가했다. 점선과 빈 원은 그림에서 투영된 값을 나타낸다. 출처: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

¹⁰⁵ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All*, https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000130141/download/?_ga=2.47516911.931354890.1634299853-763856357.1633873374.

또는 그 이상의 고통을 겪고 있는 그룹에서 대부분이 경험했다(IPC/CH 상 3 이상¹⁰⁶). 이 그룹에 속한 사람들의 수는 2020년 1억 3,500만 명에서 2021년 9월까지 1억 6,100만 명으로 19% 증가했다.¹⁰⁷ 이러한 충격의 또 다른 결과는 기아에 직면한 사람들의 수가 증가하고 생계가 완전히 붕괴되었다는 것이다(IPC/CH 상 5). 총 584,000명이 이 그룹에 속해 있고, 대부분은 에티오피아, 남수단, 예멘, 마다가스카르에 살고 있다. 2021년 1분기에는 또한 지난 6년 중 전 세계 소비자 식품 가격이 가장 높았으며 이러한 현상은 라틴 아메리카와 카리브해 지역에 집중되었다.¹⁰⁸ 서아프리카에서는 조곡의 가격이 상승하여 식품 가격이 여러 국가에서 사상 최고치를 갱신했다. 가격 인상은 시민 불안감과 폭우로 인해 악화되었다. 북아프리카에서 식량 물가 상승률은 2021년에도 완전한 수준을 유지했고 가격 인상을 막는 많은 기본 상품에 대한 보조금을 통해 완충되었다.

수문기상 위험요소가 식량 생산에 미치는 영향

2020/2021에 발생한 라니냐로 인해 강우량이 변하여 전 세계의 생계와 농업 캠페인을 방해했다. 2021년 강우 시즌 동안 관련된 기상 이변, 수문 및 기상 현상은 전년도 또는 몇 년 동안의 충격을 복합적으로 만들어 단일 기상 현상으로 인한 영향을 정량화하기가 점점 더 어려워지고 있다. 강력한 폭풍, 사이클론 및 허리케인의 지역적 영향뿐만 아니라 더블 덩 라니냐와 관련된 아프리카,

아시아 및 라틴 아메리카의 많은 지역에서 연속적인 가뭄은 생계와 반복되는 기상 충격으로부터 회복하는 능력에 상당한 영향을 미쳤다.

남아메리카의 넓은 지역에 걸친 건조한 환경은 이 지역 내의 작물 수확량을 더욱더 위협할 수 있다. 하지만 대규모 재배는 대륙 전체의 작물 생산성 손실을 대부분 상쇄했다(2020년과 비교하여 2021년 -3.6%).¹⁰⁹ 카리브해에서 아이티는 지진, 불규칙적인 비 그리고 정치적 불안정으로 인해 세 번이나 피해를 입었으며, 이는 농업 피해를 일으키고 식량 불안을 크게 악화시켰다.

서아프리카에서는 홍수와 가뭄으로 인해 국지 지역에서 농작물 피해와 손실이 발생하여 2021년에 생산량이 소폭 감소했지만 전체 아프리카 대륙의 예상 총 생산량은 평균 이상으로 유지되었다(2020년 대비 2021년 +2.9%).¹¹⁰ 2021년 동아프리카 중부와 남부 지역의 첫 번째 시즌 수확량은 지속된 가뭄으로 악영향을 받았으며, 특히 케냐는 공식적인 옥수수 수확량이 평균보다 42-70% 낮은 것으로 추산되었다.¹¹¹ 동아프리카 북부에서는 계절적 홍수의 규모와 이러한 홍수가 작물에 미치는 영향이 2020년보다 적었다. 남아프리카 공화국의 경우 마다가스카르에서 2년 연속 평균 이하의 강우량이 발생하여 주식 생산량이 심각하게 감소하고 가축 때 규모 또한 감소했다. 또한 기상 관련 위험요인, 해충 및 질병으로 인해 수확량이 급격히 감소할 것으로 예상되었으며 수확량 추정치는 5년 평균보다 50-70% 낮을 것이다.¹¹²

¹⁰⁶ The Integrated Food Security Phase Classification (IPC) is a common global scale for classifying the severity and magnitude of food insecurity and malnutrition. <https://www.ipcinfo.org/ipcinfo-website/resources/ipc-manual/en/>. The Cadre Harmonisé (CH) is a unifying tool for classifying the nature and severity of current and projected acute food and nutrition insecurity.

¹⁰⁷ Global Network Against Food Crises, 2021: *Global Report on Food Crises: Joint Analysis for Better Decisions. September 2021 Update*, http://www.fightfoodcrises.net/fileadmin/user_upload/fightfoodcrises/doc/resources/FINAL_GRFC2021_Sept_Update.pdf.

¹⁰⁸ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All*, https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000130141/download/?_ga=2.47516911.931354890.1634299853-763856357.1633873374.

¹⁰⁹ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report*, <https://www.fao.org/3/cb6901en/cb6901en.pdf>.

¹¹⁰ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report*, <https://www.fao.org/3/cb6901en/cb6901en.pdf>.

¹¹¹ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report*, <https://www.fao.org/3/cb6901en/cb6901en.pdf>.

모잠비크에서는 이 지역의 휴작기이며 취약성이 가장 높을 때인 1월 말에 사이클론 엘로이즈(Eloise)가 상륙하여, 사이클론 이다이(Idai)로부터 여전히 회복 중인 지역사회에 영향을 미쳤다. 모잠비크 정부에 따르면 사이클론으로 인해 441,000명이 넘는 사람들이 피해를 입어 약 44,000명이 실항민이 되었고 45,000헥타르 이상의 경작지가 파괴되었다.¹¹³

서남 아시아와 중동의 가뭄 상황은 곡물 생산량을 평균 이하로 감소시켰고, 주로 아프가니스탄과 시리아 아랍 공화국의 취약한 상황에서 농업과 식량 안보에 미치는 영향을 악화시켰다. 중동의 곡물 생산량이 감소한 반면 동아시아의 밀 생산량은 2021년에 사상 최고치를 기록했으며, 적절한 기상 조건으로 인해 쌀 생산량이 높은 수준을 유지했다. 이와는 반대로 중국 정부는 2021년 7월 중순에 집중 호우로 인해 심각한 인명 손실과 재산 피해를 입었다. 이는 주로 옥수수, 콩, 땅콩 등의 100만 헥타르의 농경지가 영향을 받았고, 이 중 3분의 1이 폭우로 유실되면서 국가의 식량 공급에 대한 우려를 불러일으켰다.

인도주의적인 영향과 인구 이동

난민, 국내 실항민 및 무국적자는 종종 기후와 날씨 관련 위험에 가장 취약한 사람들에 속한다. 실항민이 된 많은 취약한 개인은 다양한 규모의 기후 및 기상 위험에 노출되는 고위험 지역에 정착하게 된다. 수문기상 위험요인과 인간의 이동성은 복잡한 환경에서 사회적, 정치적 긴장 및 분쟁과 교차될 수 있다.

따라서 조기 경보 시스템, 대비 그리고 토지 이용과 도시 계획과 같은 장기적인 지속 가능한 개발 문제를 비롯한 여러 개의 위험요인 재해 위험 감소 조치에 대한 통합된 고려가 필요하다.

기후 관련 위험은 새 실항민 발생의 주요 동인이었다.

극한 날씨, 물, 기후 현상 및 환경은 인구 이동과 이미 일년 내내 이미 집을 잃은 사람들의 취약성에 크고 다양한 영향을 미쳤다. 아프가니스탄에서 중앙 아메리카에 이르기까지 가뭄, 홍수 및 기타 극단적인 기상 상황이 복구 및 적응에 가장 취약한 사람들에게 피해를 입혔다.¹¹⁴ 예년과 마찬가지로 2021년 가장 큰 규모의 이동 중 다수가 인구가 많은 아시아 국가에서 발생했다. 2021년의 대부분의 재해로 인한 이동은 동아시아와 태평양, 남아시아, 아메리카 및 사하라 사막 이남의 아프리카의 열대성 폭풍과 홍수에 기인하였다.

2021년 동안 위험한 수문 기상 현상과 환경 악화로 인해 노출되고 취약한 환경에 처한 수백만 명의 사람들이 실항민이 되었다. 위험한 수문 기상 현상과 환경 악화에는 홍수, 폭풍, 산불과 같이 빠르게 발생하는 기상 현상과 가뭄 및 사막화와 같은 천천히 발생하는 과정의 영향이 포함된다. 이는 사람들의 안전과 식량, 물, 회복력 높은 주택 및 생산적인 토지와 같은 생존을 위한 기본 요구를 충족하는 능력에 영향을 미친다. 예를 들어, 아프가니스탄에서는 상반기 동안 주로 홍수와 관련된 재해로 인해 약 22,500명의 새로운 실항민이 발생했다.¹¹⁵ 6월에 정부는 국가의 80%가 심각한 가뭄 상태로 분류되는 국가 가뭄을 선언했고, 이 외에도 인도적 지원, 개발 및 정부 관계자들은 농민들이 실항할 가능성이 매우 높을 것으로 예측하면서 갈등, 식량 불안정, COVID-19의 건강 및 사회경제적 영향이 확대되고 있다.¹¹⁶

¹¹² Famine Early Warning Systems Network (FEWSNET), 2021: *Madagascar Food Security Alert*, <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Madagascar%20Food%20Security%20Alert%20-%20June%2010%2C%202021.pdf>.

¹¹³ <https://www.fao.org/mozambique/news/detail-events/en/c/1393190/>

¹¹⁴ <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/4/60806d124/data-reveals-impacts-climate-emergency-displacement.html>

¹¹⁵ <https://story.internal-displacement.org/2021-midyear-review/index.html>

강제로 집을 떠나야 하는 사람들은 생존을 위해 재산을 팔고 위험한 일을 해야 했고, 일부 아이들은 경제적 부담을 줄이기 위한 일환으로 다른 지역이나 이웃 국가로 일하러 보내졌거나 조기 결혼에 내몰리기도 했다.¹¹⁷ 10년이 넘는 내전으로 인해 피해를 입은 시리아의 실항민 또한 폭우로 인한 홍수에 직면했으며, 2021년 1월 중순에는 142,000명에 가까운 국내 실항민이 피해를 입었다.¹¹⁸ 인도에서는 2021년 11월과 12월 사이에 100,000명 이상의 사람들이 실항민이 되었다.¹¹⁹

확립된 추세에 따라 2021년에는 위험한 기상 현상과 관련된 대부분의 새 실항민들은 국경 내에서 발생하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 대부분의 국내 이동은 특히 동아시아 및 태평양 지역에서 열대성 사이클론, 홍수, 지진 및 화산 폭발에 의해 촉발되었다. 2021년 10월 기준으로 실항민의 수가 가장 많이 기록된 국가는 중국(7월, 140만명 이상의 실항민), 베트남(9월, 664,000명 이상의 실항민), 필리핀(7월, 214,000명 이상의 실항민, 10월, 386,000명 이상의 실항민)이다.¹²⁰

동아프리카, 특히 소말리아와 에티오피아에서 홍수와 가뭄으로 대규모의 실항민이 발생했다. 홍수로 인해 거주지를 잃은 많은 사람들 외에도 홍수와 가뭄의 영향을 받은 많은 사람들이 이미 국내 실항민을 위한 과밀하고 불안정한 캠프에 살고 있었다. 사막의 메뚜기 때문에 농작물이 황폐해진 농부들 또한 생존을 위한 원조를 찾아 강제로 이동해야 했다.¹²¹

수단의 알가나(Alghana) 난민 캠프는 2021년 11월 홍수로 침수되어 3만5천명의 남수단 난민이 긴급 지원을 필요로 했다.¹²²

고소득 국가 또한 홍수의 영향을 받았다. 미국 서부와 캐나다의 이례적인 폭염, 가뭄, 산불로 인해 수천 명의 사람들이 집을 잃었다. 산불은 또한 다른 위험요소와 관련된 위험을 가중시켜 실항민의 위험을 더욱 증가시켰다. 예를 들어, 2021년 1월에 캘리포니아에서는 폭우에 따른 의무적인 사전 대피 명령에 따라 1만5천명이 실항민이 되었다.¹²³

수문기상학적 위험요인으로 인한 장기적이고 반복적인 이동

수문기상학적 현상에 의해 촉발된 많은 이동 상황은 사람들이 이전 집으로 돌아갈 수 없거나 지역적으로 통합하거나 다른 곳에 정착할 수 있는 선택사항이 없는 상황에서 장기화되었다. 국제난민감시센터(IDMC: Internal Displacement Monitoring Center)에 따르면 2021년 초에 최소 700만 명의 사람들이 자연 재해 현상과 관련된 재해¹²⁴ 이후 국내 실항민 센터에서 생활하고 있었다. 이러한 상황에 처한 사람들의 수가 가장 많은 국가는 아프가니스탄, 인도, 파키스탄이었고, 에티오피아, 수단, 방글라데시, 니제르, 예멘이 그 뒤를 따랐다.¹²⁵

출신 지역(및 귀환 지역) 또는 정착지에서 계속되거나 증가하는 위험으로 인해 수문 기상 현상때문에 실항민이 된 사람들은 반복적이고 빈번한 이동의 대상이 될 수 있으며

¹¹⁶ <https://prod.drc.ngo/about-us/for-the-media/press-releases/2021/7/drought-crisis-in-afghanistan-intensifies-risk-of-displacement>

¹¹⁷ <https://prod.drc.ngo/about-us/for-the-media/press-releases/2021/7/drought-crisis-in-afghanistan-intensifies-risk-of-displacement>

¹¹⁸ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000007-syr>

¹¹⁹ <https://www.internal-displacement.org/global-displacement-map>

¹²⁰ <https://www.internal-displacement.org/global-displacement-map>

¹²¹ <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/8/611a2bca4/displaced-somalis-refugees-struggle-recover-climate-change-brings-new-threats.html>

¹²² <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/11/619c9aea4/refugees-count-losses-floods-destroy-camp-sudan.html>

¹²³ <https://story.internal-displacement.org/2021-midyear-review/index.html>

¹²⁴ https://www.internal-displacement.org/sites/default/files/publications/documents/grid2021_idmc.pdf

¹²⁵ <https://www.internal-displacement.org/global-displacement-map>

충격과 다음 충격 사이에서 회복할 시간을 거의 갖지 못한다. 예를 들어 인도네시아에서 올해 상반기에 557,000명의 새로운 재해 실향민이 발생했고, 이들 대부분은 큰 우기 홍수로 인해 발생했다. 삼림 벌채, 도시화, 토지 황폐화를 비롯한 인간의 활동은 인도네시아의 일부 지역에서 폭우를 흡수하는 능력을 감소시켰다. 우기 절정 직전인 2021년 10월과 11월 사이에 폭우와 홍수로 50,000명 이상의 실향민이 발생했고, 이로 인해 2020년 실향민 수치는 두 배가 되었다.¹²⁶ 이러한 상황은 재난 대비 및 위험 관리의 중요성뿐만 아니라 지속 가능한 이동 해결책을 지원하고 반복되는 재난과 이동에 의해 생활 환경이 점진적으로 파괴될 수 있는 사람들의 회복력을 지원하는 것의 중요성을 강조한다.

국내 실향민과 난민에 의해 발생하는 분쟁의 영향을 받는 국가가 직면한 다양한 어려움에 위협한 기상 현상과 변화하는 기후 상황이 더해졌다.

예멘에서는 홍수와 가뭄과 같은 위험한 기상현상이 대피소와 기반시설을 파괴하고, 시장 및 기본 서비스에 대한 접근을 제한하고, 생계를 위협하고, 치명적인 질병 확산을 촉진시키며 사망자 수를 늘리는 등 사람들의 취약성을 악화시켰다. 4월 중순에 폭우와 홍수가 전국 여러 지역을 강타하여 7천명이 피해를 입었고, 이 중 75%는 불안정한 환경에서 생활하는 국내 실향민이 되었다.¹²⁷ 이는 이미 400만 명이 넘는 국내 실향민이 발생한

세계에서 네 번째로 큰 국내 실향민 위기였던 상황에서 인구 이동에 기여했다. 우기에는 특히 해안 지역에 폭우, 강풍 및 홍수가 발생하며 2021년에는 수천 가구가 돌발 홍수의 영향을 받는다. 홍수는 또한 도로를 막아 인명 구조 활동을 방해한다.¹²⁸

모잠비크에서는 2019년 발생한 사이클론 *이다이(Idai)*와 *케네스(Kenneth)* 이후 여전히 대피한 수천 가구를 포함하여 반복되는 질병 발생과 분쟁 외에도 여러 번의 열대성 폭풍과 홍수가 사람들의 취약성을 크게 증가시켰다. 1월에 열대성 폭풍우 *칼레인(Chalane)*과 사이클론 *엘로이즈(Eloise)*가 일으키는 강한 바람과 홍수로 인해 학교와 병원뿐만 아니라 8,700명이 넘는 국내 재해민의 대피소가 손상되거나 파괴되었다.¹³⁰ 이러한 기상 현상은 또한 사이클론 *엘로이즈*로 인해 43,300명 이상의 사람들이 거주지를 떠나면서 새로운 실향민이 발생했다.¹³¹ 수만 명의 사람들이 실향민으로 남아 있고 복구는 지연되고 있다.¹³² 복합 재해, 반복되는 질병 발생 및 분쟁의 영향은 이 지역 사람들의 취약성을 크게 증가시켰다. 이러한 상황과 다른 지역의 유사한 상황은 취약하고 분쟁의 영향을 받는 상황에서 기후 관련 취약성과 위험을 감소시키고 지역사회 기반 대비를 강화하기 위한 더 많은 노력을 통해 개선될 수 있다.¹³³

나이지리아에서도 농업 활동에 영향을 미친 가뭄과 홍수가 발생했으며, 이로 인해 북동부 지역의 분쟁으로 실향민들의 피난처가 손실되고 취약성이 증가했다. 이러한 상황은 2021년 상반기에 더욱 악화되어 2021년 1월과 6월 사이에 약 294,000명의 새로운 난민이 보고되었다.¹³⁴

¹²⁶ <https://story.internal-displacement.org/10-internal-displacement-situations-to-watch-in-2022/index.html> ¹²⁷

https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Humanitarian%20Update_May%202021%20v4.pdf ¹²⁸

<https://reliefweb.int/report/yemen/climate-crisis-exacerbates-humanitarian-situation-yemen-enar>

¹²⁹ <https://www.unhcr.org/news/briefing/2021/4/606c17bf4/unhcr-scales-response-thousands-flee-attacks-northern-mozambique.html>

¹³⁰ <https://displacement.iom.int/reports/mozambique-%E2%80%93-flash-report-16-tropical-cyclone-elouise-january-2021?close=true>

¹³¹ <https://reliefweb.int/report/afghanistan/internal-displacement-mid-year-10-situations-review>

¹³² <https://www.unhcr.org/news/stories/2020/3/5e6a6e50b/year-people-displaced-cyclone-idai-struggle-rebuild.html> ¹³³

<https://www.unhcr.org/news/stories/2020/3/5e6a6e50b/year-people-displaced-cyclone-idai-struggle-rebuild.html> ¹³⁴

<https://www.unhcr.org/news/stories/2020/3/5e6a6e50b/year-people-displaced-cyclone-idai-struggle-rebuild.html>

방글라데시에서는 2021년 5월과 6월에 사이클론 *야스(Yaas)*에 이어 계절풍 강우가 대규모 홍수와 수백만 명의 실항민을 초래했다. 2021년 7월 Cox's Bazar에 있는 로힝야족 실항민 현장의 홍수로 6천개 이상의 대피소가 손상되었고 2만5천명 이상의 실항민이 다른 가족과 함께 공동 시설의 대피소를 찾아야 했다.¹³⁵ 홍수는 2021년 7월에 발생한 태풍 *인파(In-fa)*로 인해 수천 명의 실항민이 발생한 중국, 네팔, 필리핀에 사는 사람들에게도 큰 영향을 미쳤다. 대피소의 강화, 언덕에 구조물 건설, 배수, 도로 및 교량 개선을 포함하여 캠프 지역에서 수행된 대비 조치가 없었다면 이러한 영향은 훨씬 더 나뉠 것이다.

기후가 생태계에 미치는 영향

육지, 담수, 연안 및 해양 생태계를 포함한 생태계와 이들이 제공하는 서비스는 변화하는 기후의 영향을 받으며 일부 요소는 다른 요소보다 더 취약하다.¹³⁶ 또한 일부 생태계는 전혀 없는 속도로 악화되고 있고, 이로 인해 인간의 웰빙을 지원하는 능력이 제한되고 회복력을 구축하는 적응 능력이 감소한다.¹³⁷

예를 들어, 세계의 급수탑인 산악 생태계는 취약하고 적응 능력이 적기 때문에 기후 변화의 영향을 많이 받을 수 있다. 이는

산악 지역에 거주하거나 산악 지역 바로 밑에 거주하는 19억 명의 사람들에게 영향을 미칠 수 있다.¹³⁸ 기후 변화는 특히 강수량이 감소하고 지하수가 이미 고갈된 지역에서 물 부족 현상을 악화시킬 수 있고, 농업 생산량, 경작지 및 이미 물 부족을 겪고 있는 20억 명 이상의 사람들에게 영향을 미친다.¹³⁹

기후 변화는 또한 기후에 민감한 종에 영향을 미친다. 온도에 민감한 식물이 꽃을 피우고 이른 봄에 잎이 나오기 시작하고 늦가을에 잎이 떨어진다라는 증거가 존재한다.¹⁴⁰ 또한 전 세계적으로 바다 고기 및 민물 고기 산란 현상 그리고 동물 이동 시기에 분명한 변화가 있었다. 종의 개체량과 분포의 현저한 변화는 종 간의 상호 작용에 영향을 미칠 수 있다.^{141,142} 그리고 해충, 병원체 및 질병으로 인한 생태계 및 개별 종에 대한 위협이 변화하고 있다. 기후 변화는 또한 생물다양성에 대한 다른 위협을 악화시킨다. 멸종될 것으로 예상되는 종의 수는 지구 온도가 상승하면서 현저하게 증가하며 1.5°C 온난화보다 2°C 온난화에서 30% 더 많다.¹⁴³

반면에 해양 생산성 감소, 고위도 지역과 높은 고도 지역으로의 종의 이동, 산호초 및 맹그로브의 피해를 비롯하여 해양 생태계에서 대규모 변화가 관측되었다. 1.5°C로 온난화되면 수온이 상승하고 해양의 화학적 성질(예를 들면 산성화)이

¹³⁵ <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/7/6103c43c4/floods-bring-new-misery-rohingya-refugees-bangladesh-camps.html>

¹³⁶ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Adaptation Gap Report 2020*, <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020>.

¹³⁷ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

¹³⁸ Immerzeel, W. W.; Lutz, A. F.; Andrade, M. et al. Importance and Vulnerability of the World's Water Towers. *Nature* 2020, 577 (7790), 364-369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>.

¹³⁹ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

¹⁴⁰ Hemming, D.L.; Garforth, J.; Park, T. et al. Phenology of Primary Producers. In *State of the Climate in 2020*, supplement. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2021, 102 (8), S57-S60. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0098.1>.

¹⁴¹ Scheffers, B. R.; De Meester, L.; Bridge, T.C. et al. The Broad Footprint of Climate Change from Genes to Biomes to People. *Science* 2016, 354 (6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>.

¹⁴² Thackeray, S. J.; Henrys, P. A.; Hemming, D. et al. Phenological Sensitivity to Climate across Taxa and Trophic Levels. *Nature* 2016, 535 (7611), 241-245. <https://doi.org/10.1038/nature18608>.

¹⁴³ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

변화하여 새로운 생태계가 만들어진다. 이전할 수 있는 능력이 적은 종들은 높은 사망률과 감소를 경험할 것으로 예상된다.¹⁴⁴ 기후 변화는 그린란드와 남극 빙상에도 영향을 미치고 여름에 북극해에 얼음이 없을 가능성을 높여 해양 순환과 북극 생태계를 더욱더 교란시킨다.¹⁴⁵

상승하는 온도는 해초 목초지와 다시마 숲을 비롯한 해양 및 해안 생태계의 돌이킬 수 없는

손실 위험을 높인다. 산호초는 특히 기후 변화에 취약하다. 산호초는 1.5 °C의 온난화에서 이전 커버리지 지역의 70%에서 90% 사이, 그리고 2 °C의 온난화에서는 99% 이상을 잃을 것으로 예상된다. 현재 해안 습지의 20-90%는 해수면 상승 속도에 따라 금세기 말까지 손실될 위험에 처해있다. 이는 다른 생태계 서비스 중에서도 식량 공급, 관광 및 연안 보호를 더욱 위태롭게 할 것이다.¹⁴⁶

¹⁴⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.

¹⁴⁵ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

¹⁴⁶ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

북반구 여름의 기상 이변: 준정상 행성파의 역할과 북극 온난화의 증폭

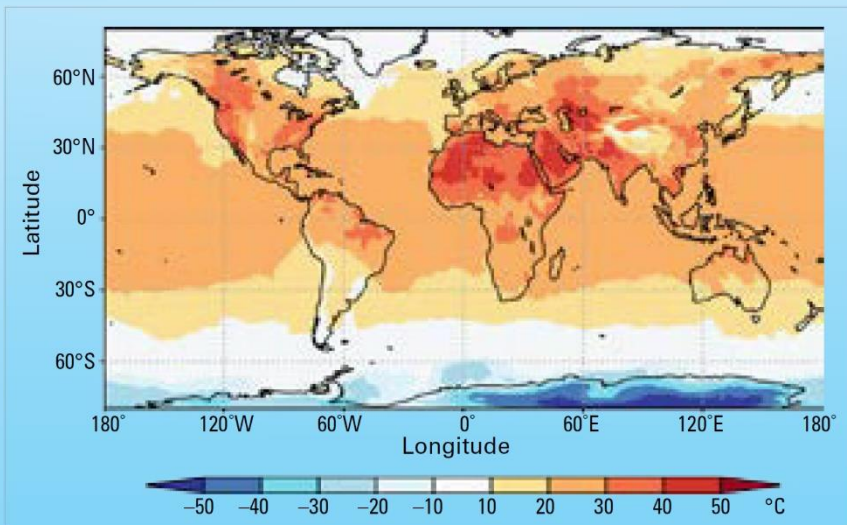
José Álvaro Silva (WMO)

2021 북반구 여름의 기상 이변: 간략한 설명

북반구(NH)의 중위도 지역에서 2021년 여름 동안 여러 번의 기상 이변과 기후 현상이 발생했다. 기록적인 더운 날과 폭염, 심각한 가뭄, 강력하고 파괴적인 산불 그리고 폭우로 인해 막대한 피해와 많은 사망자가 발생했다. 이에 대해서는 [2021년의 위험 기상 현상](#) 섹션에서 자세히 설명한다.

무더운 여름이 일찍 시작되어 6월에 북아프리카, 동유럽, 중동을 비롯한 여러 북반구 지역에서 극심한 더위가 발생했다. 6월 말에 미국 북서부와 캐나다 서부에서 고온이 특히 이례적이었다(그림 23). 브리티시 컬럼비아의 리턴(Lytton)은 6월 29일 49.6°C를 기록했으며 이는 캐나다의 새로운 기록이다. 7월 9일, 여름 동안, 여러 번의 폭염이 미국 남서부에 나타났으며, 이로 인해 Furnace Creek 기상 관측소는(캘리포니아의 데스밸리) 2년 연속 54.4 °C 도달했다. (이는 적어도 지난 90년 동안 세계 최고 기온이다.)

그림 23. 2021년 6월 29일, 최고 기온(°C)의 ERA5 재분석.
출처: Copernicus Climate Change Service and KNMI Climate Explorer.



7월 14일과 15일에 유럽 서부의 일부 국가에서 이례적으로 심각한 홍수가 발생했다. 독일 서부와 벨기에 동부 일부 지역은 장기간의 집중호우로 가장 큰 피해를 입었다. 불과 며칠 후에 중국 해난성에서는 7월 17일에서 21일 사이에 정저우에 내린 평균 강수량보다 더 많은 비가 내렸고, 7월 20일의 1시간 동안 강우량 총계는 201.9 mm로 중국의 기록을 갱신했다.

8월에 극심한 더위는 일부 지중해 국가에 영향을 미친 강력하고 파괴적인 산불과 관련이 있다. 8월 11일 이탈리아 시칠리아 시라쿠사 근처에 위치한 관측소는 유럽의 최고 잠정 기록인 48.8 °C에 도달했다.

북반구 여름 기상 이변의 잠재적 원인 및 메커니즘

최근 수십 년 동안 나타난 추세에 따라 2021년 북반구 여름에는 수많은 날씨와 기상 이변이 나타났다. 하지만 북반구 여름 기상이변의 발생빈도가 증가하고 강화된 원인은 무엇인가?

특정 유형의 기상 및 기후 이변의 빈도는 기후 변화¹로 인해 증가하고 있으며, 일부 원인규명 연구^{2,3,4,5,6,7,8}에 따르면 최근 많은 단일 기상 현상이 더욱 강렬해졌다. 이러한 연구의 일부에 따르면, 기상 이변의 전개에는 광범위한 시공간 규모와 대기 과정이 관련되어 있지만, 기상 이변의 발생 배경에는 보통 변칙적인 대규모 순환 패턴이 작용하고 있고, 준공명 순환 체계가 중요한 역할을 하고 있음을 시사한다.

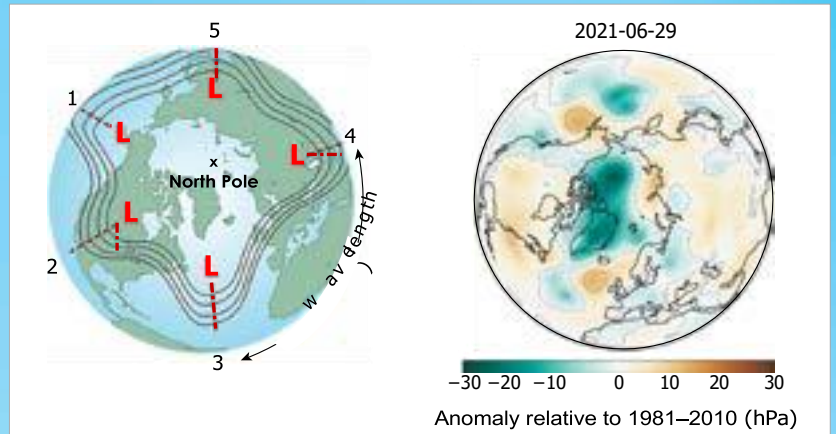
준공명 증폭

대기 역학, 특히 행성 파동 역학과 관련된 물리적 메커니즘이 극지 제트 기류 및 북반구 여름의 극한 온도의 지속적인 교란과 관련된 특성을 설명할 수 있다는 증거가 증가하고 있다.^{9,10,11} Rossby파¹²(그림 24), 특히 이러한 중위도 고진폭파(구역 파수 6-8)의 준공명 증폭(QRA)¹³은 극한 온도와 관련된 조건을 이끄는 중요한 메커니즘이다.^{14,15, 16} 제트 기류는 날씨 패턴을 형성하는데 중요한 역할을 하고, 이 천천히 움직이는 파와 관련하여 제트기류가 약해지고 하늘거릴 때 서쪽에서 동쪽으로 기류가 느리게 이동하면서 기상 시스템이 몇 주 동안 지속될 수 있는 장기간 동안 거의 정지 상태로 유지되는 차단 상황이 발생한다.^{17, 18}

북극 온난화 증폭

지난 50년 동안 북극의 온도는 전 세계 속도¹⁹의 두 배 이상으로 높아졌고, 이는 북극 증폭(AA)으로 알려진 기후 변화의 두드러진 특징이다.²⁰ AA는 폭풍의 진로를 약화시키고 제트 기류의 위치를 옮겨 준정상파를 증폭함으로써 중위도 여름 순환에 영향을 미친다. 이러한 역학적 변화가 지역 기상 조건에 어떻게 영향을 미치는지와 관련하여 일부 불확실성이 남아 있지만²¹ 최근 수십 년 동안 QRA^{22,23}에 유리한 조건의 발생은 증폭된 북극 온난화와 관련될 수 있는 지속적인 기상 이변 현상의 발생을 촉진했고, 따라서 기후 변화 영향은 증폭된 북극 온난화를 통해 전달된다는 사실이 일반적으로 받아들여지고 있다.²⁴ 하지만 관측과 기후모델 시뮬레이션은 명확한 인과관계를 뒷받침하지 않아 명확한 연관성을 확립하기 어렵다고 주장되고 있다.

AA의 원인은 아직 완전히 이해되지 않았지만 IPCC 6차 평가보고서에 대한 제I실무그룹 기고문 4장에서 강조하여 설명된 대로 AA를 구동하는 물리적 메커니즘에 대한 이해는 지난 10년 동안 향상되었고, 보고서에 언급된 여러 연구 결과는

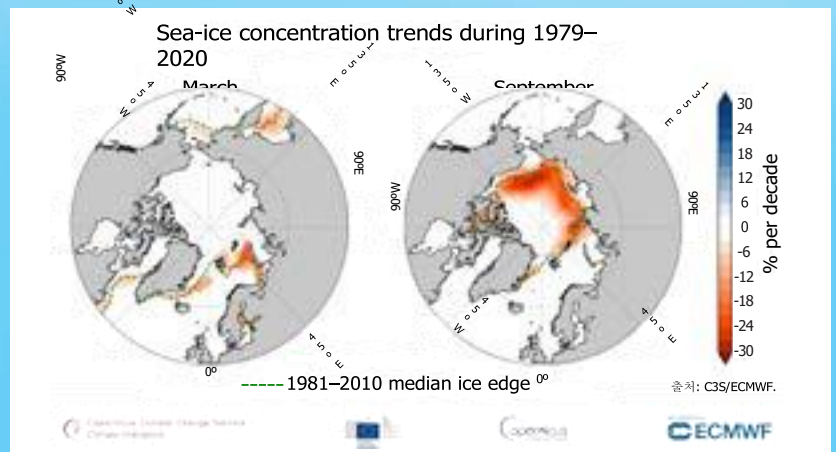


이러한 현상의 원인이 되는 다양한 프로세스와 긍정적인 피드백을 정의하고 있다.²⁵ 첫 번째 연구 결과는 해빙 손실(그림 25)과 관련이 있고, 이는 표면 알베도의 변화(반사 열음이 더 어두운 해양으로 바뀜)를 일으켜 태양 복사로부터 더 많은 열을 흡수한다. 이를 해빙 알베도 피드백이라고 한다. AA를 유발하는 다른 중요한 대기 과정은 온도(플랑크와 감율 모두), 구름 그리고 수증기 피드백이다.²⁶ 대기와 해양의 적도에서 극으로의 열과 습기 이동의 증가 또한 AA의 동인으로 확인되었다.

요약하면, 중요한 지식 격차를 메우기 위해 여름 순환과 기후 변화에 초점을 맞춘 연구가 더 전개될 필요가 있지만 북극 온난화와 관련된 중위도 여름 순환의 변화(증폭되고 더 안정된 행성과, 더 약하고 하늘거리는 제트 기류)가 차단 상황 증가와 관련되어 북반구에서의 기상 이변 발생에 일조한다.

그림 24. 왼쪽: 5 개의 행성과 패턴의 도식적인 예. 출처: NOAA/NWS. 오른쪽: 느리고 예측할 수 없는 제트 기류와 관련된 2021년 6월 29일의 해수면 기압 이상(1981-2010 년의 차이). ERA5 재분석 결과의 데이터. 출처: Copernicus Climate Change Service.

그림 25. 1979-2020 년 3 월과 9 월의 해빙 농도 추세. 출처: C3S, <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-ice>.



참고문헌

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
2. Philip, S. Y.; Kew, S. F.; van Oldenborgh, G. J. et al. Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. *Earth System Dynamics Discussions*, In review, 1–34. Preprint: <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.
3. Kreienkamp, F.; Philip, S. Y.; Tradowsky, J. S. et al. *Rapid Attribution of Heavy Rainfall Events Leading to the Severe Flooding in Western Europe During July 2021*. World Weather Attribution, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>.
4. van Oldenborgh, G. J.; van der Wiel, K.; Kew, S. et al. Pathways and Pitfalls in Extreme Event Attribution. *Climatic Change* **2021**, 166 (1), 13. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>.
5. Herring, S. C.; Christidis, N.; Hoell, A. et al., Eds.; Explaining Extreme Events of 2017 from a Climate Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2019**, 100 (1), S1–S117. <https://doi.org/10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2017.1>.
6. Lu, C.; Lott, F.; Sun Y. et al. Detectable Anthropogenic Influence on Changes in Summer Precipitation in China. *Journal of Climate* **2020**, 33 (13), 5357–5369. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0285.1>.
7. Kahraman, A.; Kendon, E. J.; Chan, S. C. et al. Quasi-stationary Intense Rainstorms Spread across Europe under Climate Change. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (13), e2020GL092361. <https://doi.org/10.1029/2020GL092361>.
8. Sun, Y.; Dong, S.; Zhang X. et al. Anthropogenic Influence on the Heaviest June Precipitation in Southeastern China since 1961. In: *Explaining Extremes of 2017 from a Climate Perspective*, supplement. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2019**, 100 (1), S79–S84. <https://doi.org/10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2017.1>.
9. Mann, M. E.; Rahmstorf, S.; Kornhuber, K. et al. Projected Changes in Persistent Extreme Summer Weather Events: The Role of Quasi-resonant Amplification. *Sci. Advance* **2018**, 4 (10), eaat3272. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3272>.
10. Coumou, D.; Petoukhov, V.; Rahmstorf, S. et al. Quasi-resonant Circulation Regimes and Hemispheric Synchronization of Extreme Weather in Boreal Summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2014**, 111 (34), 12331–12336. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>.
11. Petoukhov, V.; Petri, S.; Rahmstorf, S. et al. Role of Quasiresonant Planetary Wave Dynamics in Recent Boreal Spring-to-autumn Extreme Events. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2016**, 113 (25), 6862–6867. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606300113>.
12. A Rossby wave is a large horizontal atmospheric undulation associated with the polar jet stream and separates cold polar air from warm tropical air. These planetary waves play an important role in the poleward transports of energy and moisture.
13. The amplified Rossby waves associated with a meandering jet stream become slow and cause wave resonance known as quasi-resonant amplification (QRA).
14. Petoukhov, V.; Rahmstorf, S.; Petri, S. et al. Quasiresonant Amplification of Planetary Waves and Recent Northern Hemisphere Weather Extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2013**, 110 (14), 5336–5341. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222000110>.
15. Kornhuber, K.; Petoukhov, V.; Petri, S. et al. Evidence for Wave Resonance as a Key Mechanism for Generating High-amplitude Quasi-stationary Waves in Boreal Summer. *Climate Dynamics* **2016**, 49 (5), 1961–1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3399-6>.
16. Kornhuber, K.; Coumou, D.; Vogel, E. et al. Amplified Rossby Waves Enhance Risk of Concurrent Heatwaves in Major Breadbasket Regions. *Nature Climate Change* **2020**, 10 (1), 48–53. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0637-z>.
17. Teng, H.; Branstator, G.; Wang, H. et al. Probability of US Heat Waves Affected by a Subseasonal Planetary Wave Pattern. *Nature Geoscience* **2013**, 6 (12), 1056–1061. <https://doi.org/10.1038/ngeo1988>.
18. Grams, C. M.; Binder, H.; Pfahl, S. et al. Atmospheric Processes Triggering the Central European Floods in June 2013. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2014**, 14 (7), 1691–1702. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1691-2014>.

19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
20. Francis, J. A.; Vavrus, S. J. Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-latitudes. *Geophysical Research Letters* **2012**, *39* (6), L06801. <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>.
21. Coumou, D.; Di Capua, G.; Vavrus, S. et al. The Influence of Arctic Amplification on Mid-latitude Summer Circulation. *Nature Communications* **2018**, *9* (1), 2959. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8>.
22. Petoukhov, V.; Rahmstorf, S.; Petri, S. et al. Quasiresonant Amplification of Planetary Waves and Recent Northern Hemisphere Weather Extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2013**, *110* (14), 5336-5341. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222000110>.
23. Kornhuber, K.; Petoukhov, V.; Petri, S. et al. Evidence for Wave Resonance as a Key Mechanism for Generating High-amplitude Quasi-stationary Waves in Boreal Summer. *Climate Dynamics* **2016**, *49* (5), 1961–1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3399-6>.
24. Mann, M.; Rahmstorf, S.; Kornhuber, K. et al. Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. *Scientific Reports* **2017**, *7* (1), 45242. <https://doi.org/10.1038/srep45242>.
25. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
26. Previdi, M.; Smith, K. L.; Polvani, L. M. Arctic Amplification of Climate Change: A Review of Underlying Mechanisms. *Environmental Research Letters* **2021**, *16* (9), 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.

기후 모니터링을 위한 관측 근거

기후 모니터링은 대기, 해양, 수문학, 빙하권 및 생물권을 포괄하는 관측 시스템에 의해 수행된다. 각 영역은 다양한 조직에서 다른 방식으로 모니터링된다. 이 모든 영역을 포괄하는 위성 관측은 지구 기후 모니터링에 중요한 기여를 한다.

1992년에 세계기후관측시스템(GCOS)은 WMO에 의해 설립되었고, 유엔 교육 과학 문화 기구(UNESCO), 유엔 환경 계획(UNEP) 및 국제 과학 위원회(ISC)의 정부간 해양학 위원회(IOC)는 지구 기후 관측의 개발 및 개선을 조정하고 촉진한다. GCOS는 완화 및 적응 전략을 계획할 뿐만 아니라 기후의 궤적을 이해, 모델링 및 예측하는데 필요한 정보를 함께 제공하는 일련의 핵심기후변수(Essential Climate Variables, ECVs)를 식별했다(그림 26). 이러한 ECV에 대한 관측 기반의 현황은 정기 현황 보고서에

공개된다. GCOS는 또한 실행 보고서에서 시스템 개선에 필요한 사항을 식별한다.

GCOS가 조정하는 GSN(Global Surface Network) 및 GUAN(Global Upper Air Network)에서 제공하는 관측 이외에 WMO 회원국의 국가수문기상서비스(NMHS)는 주로 운영 기상 예측을 위해 획득한 보다 포괄적이고 광범위한 관측 네트워크를 제공한다. WMO의 GBON(Global Basic Observing Network)은 기능과 관측 일정을 규정하고 국제 데이터 교환을 필수적으로 하계끔 설계된 국제 네트워크로, 수치 기상 예측에 중요한 관측자료를 제공하고 기후 모니터링 강화에 현저히 기여할 것이다.

지구상에서 가장 가난하고 가장 열악한 관측 지역에서 GBON의 구현 및 운영에 필요한 재정 및 기술 지원을 제공하기 위해 WMO와 수문기상 개발을 위한 연합체(Alliance for Hydromet Development)^a의

2016 Essential Climate Variables (ECVs)			
Atmospheric	Surface	Physical	Hydrology
	Precipitation, surface pressure, surface radiation budget, surface wind speed and direction, surface temperature, surface water vapour	Ocean surface heat flux, sea ice, sea level, sea state, sea-surface salinity, sea-surface temperature, subsurface currents, subsurface salinity, subsurface temperature	Groundwater, lakes, river discharge, soil moisture
	Upper air	Biogeochemical	Cryosphere
	Earth radiation budget, lightning, upper-air temperature, upper air water vapor, upper-air wind speed and direction		Glaciers, ice sheets and ice shelves, permafrost, snow
Composition	Biological/ecosystems	Biosphere	
Aerosol properties, carbon dioxide, methane and other greenhouse gases, cloud properties, ozone, aerosol and ozone precursors	Marine habitat properties, plankton	Above-ground biomass, albedo, fire, fraction of absorbed photosynthetically active radiation, land cover, land surface temperature, latent and sensible heat fluxes, leaf area index, soil carbon	
		Human use of natural resources	
		Anthropogenic greenhouse gas fluxes, anthropogenic water use	

그림 26. GCOS 에 식별한 핵심기후변수 (ECVs)

회원들은 체계적 관측 자금지원 기구(SOFF)를 설립하고 있다.

대기의 물리적 및 역학적 특성에 대한 관측을 보완하는 WMO의 지구 대기 감시(GAW)는 WMO 회원, 연구 기관 및/또는 기관 그리고 기타 기여 네트워크에서 수행한 측정에서 신뢰할 수 있고 정확한 데이터를 얻을 수 있도록 대기 조성 측정을 조정한다.

해양 물리학, 생물 지구화학, 생물학 및 생태계의 해양 관측은 지구해양관측시스템(GOOS: The Global Ocean Observing System)을 통해 조정된다. GOOS 합동관측단(OCG: Observations Coordination Group)은 이러한 관측^b의 성과를 모니터링하고 매년 해양 관측 시스템 보고서 카드를 작성한다. 해양 관측은 일반적으로 국제 사용자에게 광범위하게 제공된다.

지상 영역에는 더 넓은 그룹의 관측 네트워크가 존재한다. 수문 관측은 일반적으로 NMHS에 의해 운영되고 WMO를 통해 조정된다.

예를 들어, 수문학, 영구 동토층, 빙하, 토지 사용 및 생물량에 관한 수많은 전문화된 전세계 지상 네트워크(GTN: Global Terrestrial Networks) 또한 GCOS에 보고를 수행한다. 데이터 교환 협약은 일반적으로는 지상 네트워크에 대해 덜 발달되었으며 많은 중요한 관측 내용이 국제 사용자에게 제공되지 않는다.

지구 관측 위성/기상위성조정그룹(CEOS/CGMS) 공동기후실무그룹(WGClimate)은 GCOS에서 확정한 ECV 요구사항에 따라 기후에 대한 위성 관측 개발에 기초한다. 그리고 72개의 개별 ECV 결과가 포함되어 있는 33개의 ECV에 대한 766개의 기후 데이터 기록을 포함하는 ECV 인벤토리를 생성했으며 더 많은 계획을 수립했다. 위성 관측은 전 세계 커버리지를 포함하는 몇몇 장점이 있지만 광학 관측은 구름에 의해 중단될 수 있다. 그리고 위성 관측은 지상 기반 관측과 함께 보완 데이터 세트로 사용되거나 검증 및 보정을 위해 사용되어 지구 관측 시스템의 귀중한 부분을 형성한다.

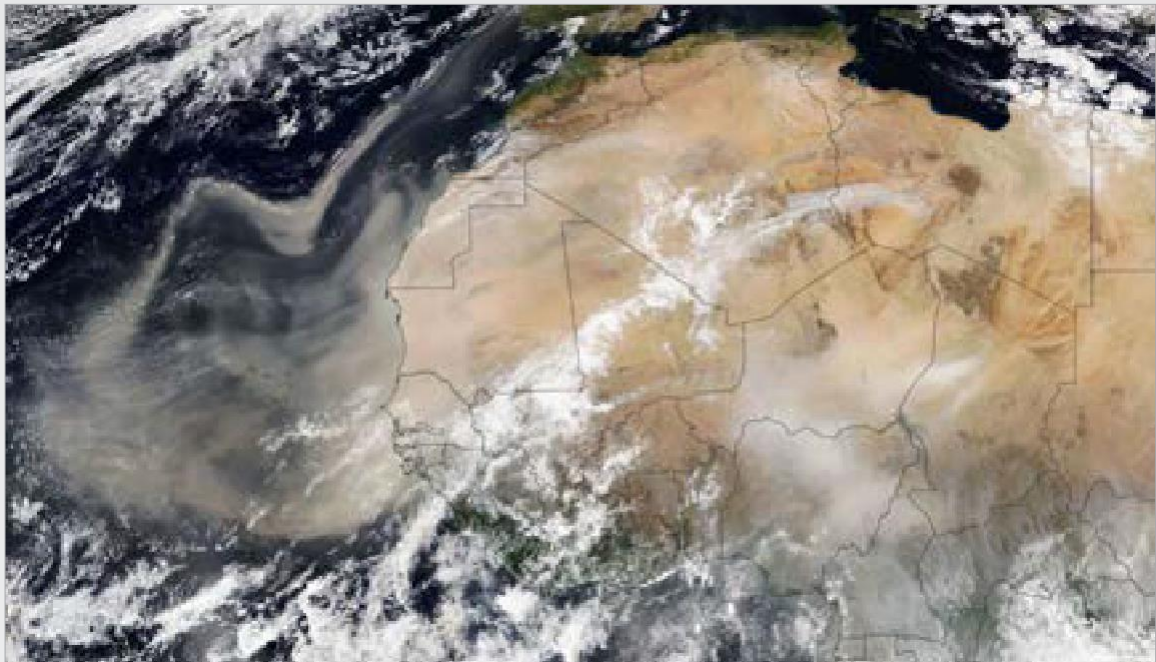


그림 27. 2021년 2월 18일에 발생한 사하라 사막의 먼지 폭풍. 이 기상 현상으로 인해 며칠 동안 공기질이 광범위하게 악화되었고, 이달 초 발생한 또 다른 사하라 사막의 먼지 폭풍은 피레네 산맥과 알프스 산맥의 눈을 덮었고, 프랑스, 독일 및 스위스를 비롯한 유럽 일부 지역의 하늘이 주황색으로 변했다.

^a <https://public.wmo.int/en/our-mandate/how-we-do-it/partnerships/wmo-office-of-development-partnerships>

^b <https://www.ocean-ops.org/>

계절내-계절 예측이 동남아시아 지역의 재난 위험 대비를 향상시킬 수 있는가?

2021년 9월 20-26일 사례 연구 검토

Estelle De Coning¹, Thea Turkington²,
Frederic Vitart³, Andrew Robertson⁴, Ryan Kang²,
Wee Leng Tan²

¹ WMO

² National Environment Agency, Singapore

³ S2S Co-chair, European Centre for Medium Range
Weather Forecasts

⁴ S2S Co-chair, International Research Institute for Climate
and Society

동남아시아(SEA)는 S2S 시간 규모에서 가장 높은 예측력이 보이는 지역으로서 계절내-계절(S2S) 기후 서비스의 이점을 누릴 수 있는 중요한 위치에 있다. 동남아시아 국가 연합(ASEAN) 전문 기상 센터(ASMC) 및 그 파트너(UN ESCAP,^a RIMES,^b the AHA Centre^c)는 S2S SEA 파일럿 프로젝트에 따라 재해 위험 감소를 위해 SEA에서 S2S 정보를 개발하기 위해 노력하고 있고, 이는 WMO, 세계기상연구프로그램(WWRP) 및 세계기후연구프로그램(WCRP)에서 수행한 S2S 예측 프로젝트 실시간 파일럿 이니셔티브의 일부이다. 이 프로젝트의 목표는 재난 위험 감소를 위한 S2S 예측의 유용성을 탐색하는 것이다.

2021년 9월 20일에서 26일 사이에 필리핀, 솔라웨시 및 인도네시아 동부 보르네오에서 5만명^d 이상의 사람들이 홍수로 피해를 입었다. 같은 주에 열대성 사이클론 덴무(Dianmu)^e는 베트남, 캄보디아 및 태국의 일부 지역에 심각한 홍수를 일으켜 180,000명 이상의 사람들에게 영향을 미쳤다.^e

S2S SEA 파일럿 프로젝트의 예측에 따르면, 사례 연구 주간 3주 전에 인도네시아 남동부에 폭우가 내릴 가능성이 약간 증가할 확률로 예측되었다. 이 기상 현상은 솔라웨시, 말루쿠 제도 및 서파푸아에서 약간 증가하기 일주일 전에 발달하여 태국, 라오스, 베트남, 필리핀 남부, 수마트라 남부, 보르네오 동부 및 자바의 일부 지역까지 약간 증가할 확률이 높아졌다. 이 전망은 AHA 센터의 국가 재난관리기관과 기타 기관에 보내지는 주간 보고서^f에 보고되었고, 완벽한 예측 접근방식을 위한 단계의 영역의 예인 후속 일기 예보와 함께 덴무(Dianmu)^g 및 기타 위험요인에 대한 대비를 뒷받침한다.

이러한 결과는 지금까지 파일럿 프로젝트의 일반적인 결과로, 해양 대륙(Maritime Continent)에서 극심한 강우가 내릴 확률의 증가는 일반 지역에서 하나 이상의 위험한 기상 현상이 발생할 수 있음을 3주 전에 알리는 좋은 지표이다. 하지만 이 지표는 전망이 종종 일주일 전에만 증가되는 가능성을 예측하는 동남아시아 본토에서는 유효하지 않다. 위험한 기상 현상 확률이 증가하면 재난의 확률 또한 증가한다. 계절내 시간 척도에서 임박한 위험한 기상 현상의 징후가 항상 있는 것은 아니지만 비교적 적은 수의 잘못된 경보는 기상 현상 전개 대상 모니터링 및 제도적 프로세스를 조기에 활성화하여 대비 및 대응을 보다 효율적으로 하는 것과 같은 계절내 시간 척도에서 조치를 취할 수 있음을 의미한다.

^a United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific: <https://www.unescap.org/>

^b Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System for Africa and Asia: <https://www.rimes.int/>

^c ASEAN Coordinating Centre for Humanitarian Assistance on Disaster Management: <https://ahacentre.org/>

^d <https://adinet.ahacentre.org>

^e <https://adinet.ahacentre.org>

^f https://ahacentre.org/wp-content/uploads/2021/09/DWeek_37_13-19Sep2021.pdf

^g <https://ahacentre.org/flash-update/flash-update-no-01-tropical-depression-21w-twentyone-viet-nam-23-september-2021/>

데이터 세트 및 방법

온실 가스 데이터

1750년의 추정 농도는 산업화 이전의 상태를 나타내는 데 사용된다. 계산은 산업화 이전의
물분율이 CO₂는 278 ppm, CH₄는 722 ppb 그리고 N₂O는 270 ppb라고 가정한다.

World Data Centre for Greenhouse Gases operated by Japan Meteorological Agency <https://gaw.kishou.go.jp/>.

World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin – No. 17: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020*. Geneva, 2021.

World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre operated by Environment and Climate Change Canada <https://woudc.org/home.php>.

전지구 온도 데이터

전지구 평균 온도 시계열

1850-1900년 베이스라인과 관련된 전지구 온도 편차를 계산하는 방법은 *2020년 전지구기후협약* 보고서가 발간된 이후 업데이트되었다. 이 방법은 IPCC 6차 평가 보고서에 대한 기고에서 실무 그룹 I이 수행한 평가, 장기 변화 및 불확실성을 반영하기 위해 업데이트되었다. 이 새로운 방법은 또한 최근의 온도 변화에 대한 권위 있는 평가를 제공하기 위해 정기적으로 업데이트되는 더 넓은 범위의 짧은 데이터 세트를 사용한다.

2020년 보고서(및 이전 보고서)에서 1850-1900년 베이스라인과 관련된 변화는 1850년까지 다시 확장된 유일한 데이터 세트인 HadCRUT4 데이터 세트에 기초했다. 다른 데이터 세트는 1880-1900년의 기간(NASA GISTEMP 및 NOAA GlobalTemp) 또는 1981-2010년의 기간(ERA5, JRA-55) 동안 HadCRUT4의 평균과 일치하도록 오프셋되었다.

2021년에 IPCC 6차 평가 보고서 실무 그룹 I은 평균 4개의 데이터 세트를 기반으로 1850-1900년 -다른 기간 동안 발생한 변화를 평가했다. - HadCRUT5, Berkeley Earth, NOAA-Interim and Kadow et al. (2020) - 모두 1850년까지 거슬러 올라간다. 이들은 가장 차가운 데이터 세트의 불확실성 범위의 하한에서 가장 따뜻한 데이터 세트의 불확실성 범위의 상한까지 취한 4개 추정치의 범위를 고려하여 불확실성을 평가했다. 작업 그룹 I은 1850년까지 거슬러 올라가는 4개의 데이터 세트를 사용하여 불확실성에 대한 더 포괄적인 추정을 할 수 있었다.

4개의 IPCC 데이터 세트 중 2개가 정기적으로 업데이트되지 않기 때문에 현재 보고서에서 1850-1900년과 1981-2010년 사이의 온도 변화에 대한 IPCC의 추정은 1850-1900년과 비교하여 2021년의 편차를 계산하기 위해 1981-2010년과 6개의 데이터 세트의 현재 연도 사이의 추정된 변화와 결합된다.

1981-2010년부터 현재까지의 변화에 대한 6개의 데이터 세트 간에는 완벽하지는 않지만 일치하는 부분이 존재한다. 왜냐하면 이 기간은 양호한 관측 커버리지가 있는 기간이기 때문이다. 6개 데이터 세트의 확산으로 인해 발생하는 추가적인 일반적 불확실성은 1850-1900년에서 1981-2010년으로의 변화의 불확실성에 대한 IPCC의 추정치와 결합된다.

보다 정확히는 6개의 데이터 세트(아래 인용)가 전지구 온도 계산에 사용되었다. 다음의 단계를 사용하여 1850-1900년 베이스라인을 기준으로 전지구 평균 온도 편차를 계산했다.

1. 시작점은 데이터 제공자가 제공한 각 데이터 세트에 대한 전지구 연간 평균 기온의 시계열이었다. 편차는 다른 베이스라인에 제시되었다.
2. 각 데이터 세트에 대해 1981-2010년 기간의 평균을 빼서 1981-2010년 평균을 기준으로 이상치를 계산했다.
3. 1850-1900년과 1981-2010년 사이의 추정된 차이에 근거하여 각 시리즈에 0.69°C 의 양이 추가되었고, 이는 IPCC 6차 평가 보고서 실무 그룹 I의 방법을 사용하여 계산되었다. (숫자는 이 보고서의 그림 1.12의 캡션에 있다.)
4. 6개 추정치의 평균과 표준편차가 계산되었다.
5. IPCC 추정치의 불확실성은 두 개가 독립적이라고 가정하고 IPCC 불확실성 범위(0.54°C - 0.79°C)가 90% 신뢰 범위(1.645 표준 편차)를 대표한다고 가정하여 표준 편차와 결합되었다.

이 보고서에 인용된 2021년 수치($1.11 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$)는 1.11°C 가 6개 추정치의 평균이 되는 방식으로 계산되었다.

연간 온도 지도

연간 기온 편차의 지도를 계산하는 방법 또한 업데이트되었다. 2020년 보고서에서 단일 데이터 세트(ERA5)의 1981-2010년의 이상 현상을 보여주는 지도가 사용되었다. 지도는 단일 데이터 세트에 기초하였고, 동반된 평가는 사용 가능한 모든 데이터 세트에 기반했다.

2021년 기온 편차 지도의 경우 HadCRUT5, ERA5, NOAAGlobalTemp, Berkeley Earth 및 GISTEMP의 5개 데이터 세트의 중앙값이 사용되었고, 위도 5° x 경도 5° 격자에 표시되는 최저 해상도 데이터 세트(NOAAGlobalTemp 및 HadCRUT5 데이터 세트)의 공간 격자로 재그리드(regrid)되었다. 중앙값은 잠재적인 이상치(Outliers)의 영향을 최소화하기 위해 평균보다 우선하여 사용된다. 데이터 세트의 절반 범위는 불확실성을 나타낸다. 데이터 세트 간의 확산은 데이터 커버리지가 희박한 고위도 지역과 중앙 아프리카에서 가장 크다.

다음 6개의 데이터 세트가 사용되었다.

Berkeley Earth – Rohde, R. A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* **2020**, *12*, 3469-3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

ERA5 — Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2020**, *146* (730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

GISTEMP v4 — GISTEMP Team, 2022: *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
Lensen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, *124* (12): 6307-6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.

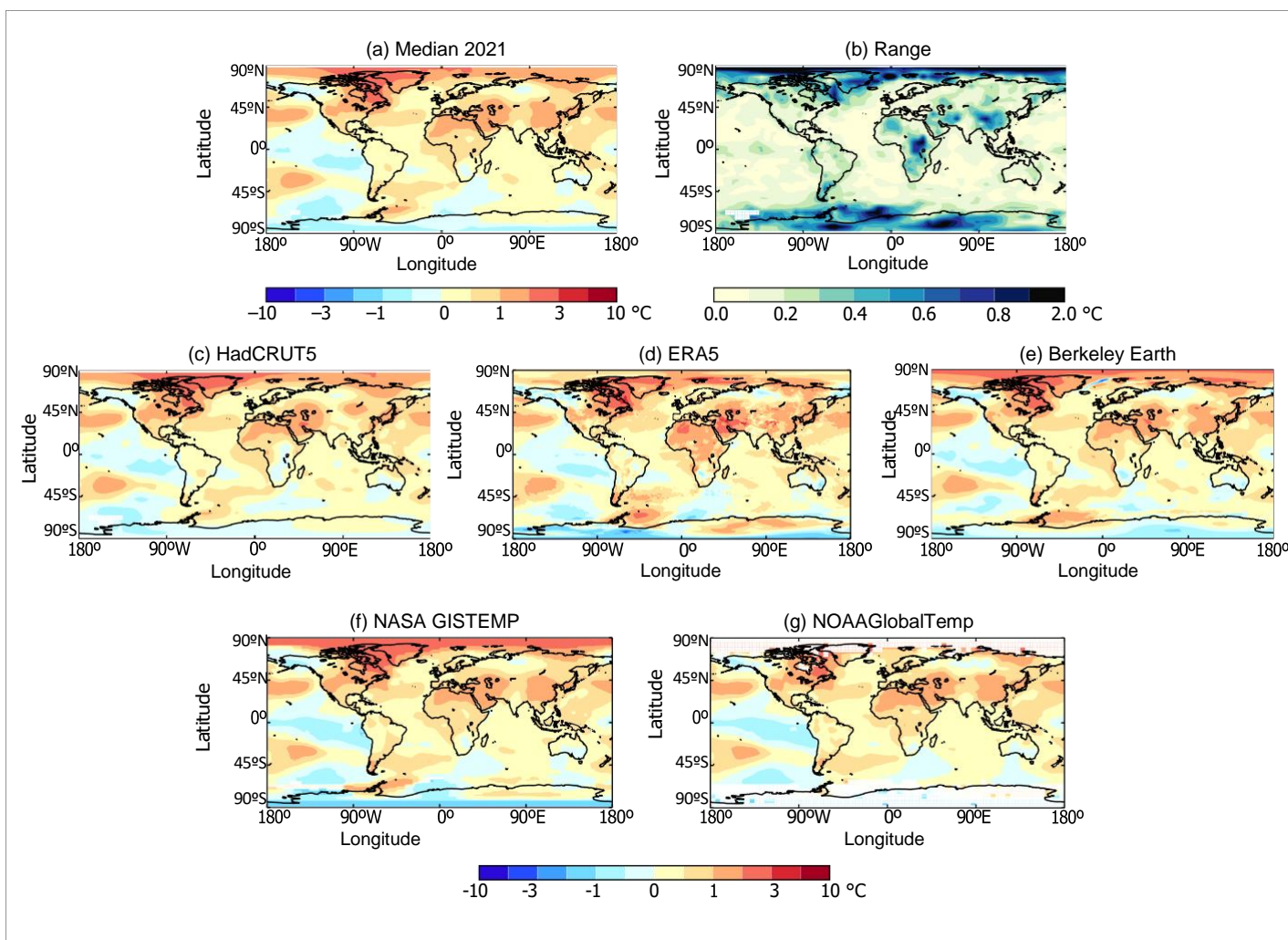
HadCRUT.5.0.1.0 — Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A. et al. An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2021**, 126 (3), e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT.5.0.1.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5> on 24 October 2021 and are © British Crown Copyright, Met Office 2021, provided under an Open Government License, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

JRA-55 — Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y. et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II **2015**, 93 (1), 5–48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/93/1/93_2015-001/_article.

NOAAGlobalTemp v5 — Zhang, H.-M., et al., NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 5.0. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5FN144H. Huang, B.; Menne, M. J.; Boyer, T. et al. Uncertainty Estimates for Sea Surface Temperature and Land Surface Air Temperature in NOAAGlobalTemp Version 5. *Journal of Climate* **2020**, 33 (4), 1351-1379. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/4/jcli-d-19-0395.1.xml>.

그림 28.

(a) 5° 격자의 5개 데이터 세트의 중앙값에 대한 1981–2021년 평균과 비교한 2021년의 지표면 부근의 기온 편차.
(b) 5개의 추정치의 범위,
(c) HadCRUT 5(5° 해상도),
(d) ERA5 (0.25°), (e) Berkeley Earth (1°), (f) GISTEMP (2°), (g) NOAAGlobalTemp (5°)에 대한 데이터 세트의 기본 해상도 격자의 지표면 부근의 온도 편차.



해양 열 함유량 데이터

2021년까지 추정치에 사용된 데이터:

- Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015, *Science Advances* **2017**, 3 (3), e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.
- Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* **2017**, 13, 163–167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.
- Lyman, J. M.; Johnson, G. C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate* **2014**, 27 (5), 1945–1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.
- von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How well can we derive Global Ocean Indicators from Argo data? *Ocean Science* **2011**, 7 (6), 783–791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>.

2020년까지 사용된 데이터:

- Desbruyères, D. G.; Purkey, S. G.; McDonagh, E. L. et al. Deep and abyssal ocean warming from 35 years of repeat hydrography, *Geophysical Research Letters* **2016**, 43 (19), 310–356. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.
- Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ–Based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height, *Journal of Climate* **2016**, 29 (4), 1305–1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.
- Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. *JAMSTEC Report of Research and Development* **2008**, 8, 47–59. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_0_47/_article.
- Kuusela M.; Stein, M. L. Locally stationary spatio-temporal interpolation of Argo profiling float data. *Proceedings of the Royal Society A* **2018**, 474, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.
- Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean heat content and thermocline sea level change (0–2 000 m) 1955–2010. *Geophysical Research Letters* **2012**, 39 (10), L10603. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.
- Li, H.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a global gridded Argo data set with Barnes successive corrections, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2017**, 122 (2), 866–889, <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.
- Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program, *Progress in Oceanography* **2009**, 82 (2), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.
- von Schuckmann, K.; Le Traon, P. -Y.; Smith, N. et al., Eds. Copernicus Marine Service Ocean State Report, *Journal of Operational Oceanography* **2018**, 11, S1–S142. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1489208>.

해수면 데이터

CNES/Aviso+ <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-access.html#c12195>의 GMSL

해양 폭염 및 해양 한파 데이터

해양 폭염(MHW)은 해수면 온도(SST)가 5일 이상 기후 분포의 90번째 백분위수 이상일 때 중간으로 분류된다. 후속 범주는 SST와 기후 분포 평균 간의 차이와 관련하여 정의된다. 즉, 강함, 심함 또는 극심함.

이러한 차이가 각각 90번째 백분위수와 기후 분포 평균 간의 차이의 2배, 3배 또는 4배 이상인 경우(Hobday et al., 2018) 해양 한파(MCS) 범주 또한 유사하지만 10번째 백분위수 미만의 해수면 온도와 관련하여 범주화된다.

MHW와 MCS에 사용된 베이스라인은 1982-2011년이고, 이는 기반이 되는 위성 SST 시리즈의 첫 번째 전체 연도가 1982년이기 때문에 1981-2010의 표준 정상 기간에서 1년 이동된다.

Hobday, A.J.; Oliver, E. C. J.; Sen Gupta, A. et al. Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography* **2018**, 31 (2), 1-13. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>.

NOAA OISST v2: Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST): Banzon, V.; Smith, T. M.; Chin, T. M. et al. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth System Science Data* **2016**, 8 (1), 165-176. <https://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016>.

빙하 질량 균형 데이터

참조 빙하의 전세계 네트워크에 대한 빙하 질량 균형 데이터는 World Glacier Monitoring Service(WGMS) (<https://www.wgms.ch>)에서 구할 수 있다. 2020-2021년 질량 균형 년도에 대한 데이터는 예비 데이터로, 32개(총 ~42개 중) WGMS 참조 빙하의 하위 세트에 기초한다. 서부 캐나다에 대한 빙하 질량 균형 데이터는 Pelto et al.가 설명된 대로 캐나다 북부 브리티시 컬럼비아 대학의 Brian Menounos가 수행한 다년, 격년(4월과 9월)의 반복 LiDAR 조사에 기초한다 (2019).

Pelto, B. M.; Menounos, B.; Marshall, S. J. Multi-year evaluation of airborne geodetic surveys to estimate seasonal mass balance, Columbia and Rocky Mountains, Canada. *The Cryosphere* **2019**, 13 (6), 1709-1727. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1709-2019>.

Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* **2021**, 592, 726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>.

그린란드와 남극 빙상 데이터

그린란드 빙상 질량 균형 데이터는 세 개의 출처에서 보고된다. 1985년부터 2021년까지 표면 질량 균형과 총질량 균형의 모델링된 변화는 Mankoff 등(2021)에 의해 설명된 세 개의 지역 기후 및 질량 균형 모델의 평균에 기초한다. 2021년 질량 균형의 대체 추정치는 PROMICE 지표면 기상 관측소 네트워크에 의해 구동되는 해빙 면적과 지표면 질량 균형 모델의 위성 관측을 기반으로 NOAA 북극 보고서 카드(Moon et al., 2021)에서 주어진다. GRACE와 GRACE-FO 미션의 총 빙상 질량 균형의 위성 중력 데이터는 Wiese et al.(2019년, 2021년으로 업데이트됨)로부터 구할 수 있다. 이들 데이터는 그린란드와 남극 빙상 모두에 대해 사용할 수 있다.

Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week. *Earth System Science Data* **2021**, 13 (10), 5001-5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.

Moon, T. A.; Tedesco, M.; Box, J. E. et al. Greenland Ice Sheet. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/546g-ms61>.

Wiese, D.N.; Yuan, D. -N; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

눈 데이터

눈 데이터와 월별 이상 시계열 차트는 다음 사이트에서 구할 수 있다. <https://climate.rutgers.edu/snowcover/files/wmo/rutgers-nh-sce-anomalies-2020-21-data.xlsx>

해빙 데이터

해빙 섹션은 EUMETSAT OSI SAF Sea Ice Index v2.1(OSI-SAF, Lavergne et al., 2019 기반)과 NSIDC v3 Sea Ice Index(Fetterer et al., 2017)의 데이터를 사용한다. 해빙 농도는 위성에서 측정한 극초단파 복사로 추정된다. 해빙 면적은 해빙 농도가 15%를 초과하는 해양 그리드 셀의 면적으로 계산된다. 데이터 세트 간의 절대 범위에는 비교적 큰 차이가 있지만 연도별 변화와 추세는 일치한다. 이 보고서에서 NSIDC 데이터는 이전 보고서와 일관성을 위해 절대 범위(예를 들면 "1895만 km²")로 보고되지만 순위는 두 데이터 세트 모두에 대해 보고된다.

EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, Sea ice index 1979-onwards (v2.1, 2020), OSI-420, OSI SAF FTP server: 1979–2020, Northern and Southern Hemisphere. <https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-420> 에서 발췌한 데이터
Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al. 2017, updated daily. *Sea Ice Index, Version 3*. Boulder, Colorado USA. National Snow and Ice Data Center (NSIDC). <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>.
Lavergne, T.; Sørensen, A. M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records. *The Cryosphere* **2019**, 13 (1), 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.

영구 동토층 데이터

Noetzli, J.; Christiansen, H. H.; Hrbáček, F. et al. Global Climate Permafrost Thermal State. In *State of the Climate in 2020*; Dunn, R. J., Aldred, H., F., Gobron, N. Eds.; *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, 102 (8); S42–S44. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0098.1>.
Smith, S. L.; Romanovsky, V. E.; Isaksen, K. et al. Permafrost. In *State of the Climate in 2020*; Druckenmiller, M. L., Moon, T., Thoman, R., Eds.; *Bulletin of the American Meteorological Society*, **2021**, 102 (8); S293–S297. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0086.1>.

강수 자료

아래 GPCC(Global Precipitation Climatology Center) 데이터 세트가 분석에 사용되었다.

- First Guess Monthly, doi: 10.5676/DWD_GPCC/FG_M_100.
- Monitoring Product (Version 2020), doi: 10.5676/DWD_GPCC/MP_M_V2020_100.
- Full Data Monthly (Version 2020), doi: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2020_100.
- First Guess Daily, doi: 10.5676/DWD_GPCC/FG_D_100.
- Full Data Daily (Version 2020), doi: 10.5676/DWD_GPCC/FD_D_V2020_100.

기고자의 목록

기고 회원국과 지역

알제리, 안도라, 아르헨티나, 아르메니아, 호주, 오스트리아, 바레인, 바베이도스, 벨로루시, 벨기에, 벨리즈, 보스니아 헤르체고비나, 보츠와나, 영국 카리브 지역, 불가리아, 부르키나 파소, 카메룬, 캐나다, 칠레, 중국, 콜롬비아, 크로아티아, 키프로스, 체코, 덴마크, 이집트, 에스토니아, 핀란드, 프랑스, 감비아, 조지아, 독일, 그리스, 그레나다, 기니, 기니비사우, 홍콩, 중국; 헝가리, 인도, 이란 이슬람 공화국, 아일랜드, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 요르단, 카자흐스탄, 케냐, 라트비아, 라이베리아, 리비아, 리투아니아, 룩셈부르크, 마카오, 중국; 마다가스카르, 말리, 몰타, 모리셔스, 모로코, 뉴질랜드, 니제르, 나이지리아, 북마케도니아, 노르웨이, 파키스탄, 페루, 필리핀, 폴란드, 포르투갈, 몰도바 공화국, 루마니아, 러시아 연방, 르완다, 세인트 빈센트 그레나딘, 사우디아라비아, 세네갈, 세르비아, 슬로바키아, 슬로베니아, 남아프리카 공화국, 스페인, 세인트 키츠 네비스, 수단, 스웨덴, 스위스, 시리아 아랍 공화국, 태국, 네덜란드, 토고, 트리니다드 토바고, 튀니지, 터키, 우크라이나, 영국, 연합 탄자니아 공화국, 미국, 우루과이, 우즈베키스탄, 짐바브웨

기고 기관

ARC Centre of Excellence for Climate Extremes, University of Tasmania, Australia; Birmingham Institute of Forest Research, Birmingham University, UK; British Antarctic Survey (BAS); Bureau of Meteorology (BoM), Australia; Carbon Portal, Lund University, Sweden; Centre National d'Études Spatiales, CNES, France; Mercator Ocean international, France; Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), France; IFREMER, France; University of Brest, France; Centre National de la Recherche Scientifique, (CNRS), France; Institut de Recherche pour le Développement (IRD), France; Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), France; Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), France; Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), France; CELAD, France; Sorbonne Université, France; Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, France; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences; Copernicus Climate Change Service (C3S); CSIRO Oceans and Atmosphere, Australia; Danmarks Meteorologiske Institut (DMI); Global Precipitation Climatology Centre, Deutscher Wetterdienst (GPCC, DWD); Environment and Climate Change Canada (ECCC); ETH Zürich, Switzerland; European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF); George Washington University, USA; Hong Kong Observatory; Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP, CAS); Japan Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC); Joint Institute for Marine and Atmospheric Research, University of Hawai'i (JIMAR), USA; Met Office Hadley Centre, UK; Department of Atmosphere, Ocean and Earth System Modeling Research, Meteorological Research Institute, Japan; National Environment Agency, Singapore (NEA); National Oceanographic and Atmosphere Administration, National Centers for Environmental Information (NOAA NCEI), USA; NOAA, Pacific Marine Environmental Laboratory (NOAA PMEL), USA; National Oceanography Centre (NOC), UK; Natural Resources Canada; Norwegian Meteorological Institute; Rutgers University, USA; Scripps Institution of Oceanography, USA; Tokyo Climate Center, Japan Meteorological Agency (TCC, JMA); Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil; University of Exeter, UK; University of Victoria, Canada; Woods Hole Oceanographic Institution, USA; World Climate Research Programme (WCRP); World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)

국제연합 기관

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), United Nations Environment Programme (UNEP), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR), International Organization for Migration (IOM), World Food Programme (WFP), Intergovernmental Oceanographic Commission – United Nations (IOC-UNESCO)

개인 기고자

Signe Aaboe (Norwegian Meteorological Institute), Jorge Alvar-Beltrán (FAO), Omar Baddour (WMO publication coordinator), Jessica Blunden (NOAA NCEI), Tim Boyer (NOAA NCEI), Anny Cazenave (LEGOS CNES and OMP), Lijing Cheng (IAP; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences), Louis Clement (National Oceanography Centre), Kyle Clem (University of Victoria), Estelle De Coning (WMO), Damien Desbruyères (IFREMER, CNRS, IRD, Laboratoire d’Océanographie Physique et Spatiale), Maxx Dilley (WMO), Robert Dunn (Met Office Hadley Centre), Simon Eggleston (WMO/GCOS), Thomas Estilow (Rutgers University), Florence Geoffroy (UNHCR), Donata Giglio (University of Colorado), Nathan Gillett (ECCC), John Gilson (Scripps Institution of Oceanography, University of California), Loretta Hieber Girardet (UNDRR), Atsushi Goto (TCC, JMA), Yvan Gouzenes (LEGOS and OMP), Stephan Gruber (Carleton University), Debbie Hemming (Met Office Hadley Centre, Birmingham Institute of Forest Research), Ana Heureux (FAO), Shigeki Hosoda (JAMSTEC), Matthias Huss (ETH Zürich), Kirsten Isensee (IOC UNESCO), Gregory C. Johnson (NOAA, PMEL), Ryan Kang (NEA), Maarten Kappelle (UNEP), John Kennedy (lead author, Met Office Hadley Centre), Valentina Khan (Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation), Rachel Killick (Met Office Hadley Centre), Brian A. King (NOC), Animesh Kumar (UNDRR), Mikael Kuusela (Carnegie Mellon University), Gernot Laganda (WFP), Thomas Lavergne (Norwegian Meteorological Institute), Yuehua Li (University of New South Wales), Renata Libonati (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Juerg Luterbacher (WMO), John Lyman (NOAA, PMEL), Shawn Marshall (ECCC and University of Calgary), Jesse Mason (WFP), Brian Menounos (University of Northern British Columbia), Audrey Minière (Mercator Ocean international), Maeva Monier (CELAD/Mercator Ocean international), Colin Morice (Met Office Hadley Centre), Lev Neretin (FAO), Stoyka Natcheva (WMO), Rodica Nitu (WMO), Jeannette Noetzli, (Institute for Snow and Avalanche Research), Ben Pelto (University of Northern British Columbia), Claire Ransom (WMO), Andrew Robertson (S2S co-chair, IRI), David Robinson (Rutgers University), Dean Roemmich (Scripps Institution of Oceanography), Kanako Sato (JAMSTEC), Katsunari Sato (JMA), Yousuke Sawa (JMA, WDCGG), Robert W. Schlegel (Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire d’Océanographie de Villefranche), Katherina Schoo (IOC UNESCO), Karina von Schuckmann (Mercator Ocean international), Rahul Sengupta (UNDRR), Fumi Sezaki (TCC, JMA), José Álvaro Silva (WMO), Sharon Smith (Natural Resources Canada), Michael Sparrow (WCRP), Martin Stendel (DMI), Peter Stott (Met Office Hadley Centre, University of Exeter), Dmitry Streletskiy (George Washington University), Toshio Suga (JAMSTEC, Tohoku University), Tanguy Szekely (OceanScope), Wee Leng Tan (NEA), Oksana Tarasova (WMO), Blair Trewin (BoM), Thea Turkington (NEA, Singapore), John Turner (BAS), Freja Vamborg (ECMWF), Alex Vermeulen (Carbon Portal, Lund University), Frederic Vitart (S2S co-chair, ECMWF), Ying Wang (UNEP), Michelle Yonetani (UNHCR), Zhiwei Zhu (Nanjing University of Information Science and Technology), Markus Ziese (DWD)



더 많은 정보를 얻으시려면 다음 주소로 연락하십시오:

세계 기상 기구

7 bis, avenue de la Paix – P.O. Box 2300 – CH 1211 Geneva 2 – Switzerland

전략 커뮤니케이션실
사무총장 내각 사무실

전화: +41 (0) 22 730 83 14

이메일: communications@wmo.int

public.wmo.int

State of the Global Climate 2021



WEATHER CLIMATE WATER



WORLD
METEOROLOGICAL
ORGANIZATION

WMO-No. 1290

WMO-No. 1290

© World Meteorological Organization, 2022

The right of publication in print, electronic and any other form and in any language is reserved by WMO. Short extracts from WMO publications may be reproduced without authorization, provided that the complete source is clearly indicated. Editorial correspondence and requests to publish, reproduce or translate this publication in part or in whole should be addressed to:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Tel.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax: +41 (0) 22 730 81 17
Email: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-11290-3

Cover illustration from Adobe Stock: Icebergs (Photo credits: z576); Forest fires, red and orange forest fires at night in the dry season (Photo credits: prirach); Shallow Coral Reef and Island in Raja Ampat (Photo credits: ead72); Flooded terrain in lowland of Great river (Photo credits: Vladimir Melnikov). iSTOCK: Terre de sécheresse au coucher du soleil. Ciel dramatique de désert. changement climatique (Photo credits: mycola).

NOTE

The designations employed in WMO publications and the presentation of material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of WMO concerning the legal status of any country, territory, city or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The mention of specific companies or products does not imply that they are endorsed or recommended by WMO in preference to others of a similar nature which are not mentioned or advertised.

The findings, interpretations and conclusions expressed in WMO publications with named authors are those of the authors alone and do not necessarily reflect those of WMO or its Members.

Contents

Key messages	2
Foreword	3
Global climate indicators	4
Baselines	4
Greenhouse gases	4
Temperature	6
Ocean	7
Cryosphere	12
Stratospheric ozone	19
Drivers of short-term variability	20
High-impact events in 2021	24
Heatwaves and wildfires	24
Cold spells and snow	25
Precipitation	26
Flood	27
Drought	28
Tropical cyclones	29
Severe storms	31
Attribution	31
Risks and impacts	33
Food security	33
Humanitarian impacts and population displacement	35
Climate impacts on ecosystems	38
<i>Northern hemisphere summer extremes: the role of the quasi-stationary planetary waves and the Arctic warming amplification</i>	40
<i>Observational basis for climate monitoring</i>	44
<i>Can sub-seasonal-to-seasonal predictions improve disaster risk preparedness for the South-east Asia region? A review of the 20–26 September 2021 case study</i>	46
Data sets and methods	47
List of contributors	53

Key messages



The global mean temperature in 2021 was around 1.11 ± 0.13 °C above the 1850–1900 pre-industrial average. This is less warm than some recent years due to the influence of La Niña conditions at the start and end of the year. The most recent seven years, 2015 to 2021, were the seven warmest years on record.



Global mean sea level reached a new record high in 2021, rising an average of 4.5 mm per year over the period 2013–2021.



The Antarctic ozone hole reached a maximum area of 24.8 million km² in 2021. This unusually deep and large ozone hole was driven by a strong and stable polar vortex and colder-than-average conditions in the lower stratosphere.



Greenland experienced an exceptional mid-August melt event and the first-ever recorded rainfall at Summit Station, the highest point on the Greenland ice sheet at an altitude of 3 216 m.



Exceptional heatwaves broke records across western North America and the Mediterranean. Death Valley, California reached 54.4 °C on 9 July, equalling a similar 2020 value as the highest recorded in the world since at least the 1930s, and Syracuse in Sicily reached 48.8 °C.



Hurricane *Ida* was the most significant of the North Atlantic season, making landfall in Louisiana on 29 August, equalling the strongest landfall on record for the state, with economic losses in the United States estimated at US\$ 75 billion.



Deadly and costly flooding induced economic losses of US\$ 17.7 billion in Henan province of China, and Western Europe experienced some of its most severe flooding on record in mid-July. This event was associated with economic losses in Germany exceeding US\$ 20 billion.



Drought affected many parts of the world, including areas in Canada, United States, Islamic Republic of Iran, Afghanistan, Pakistan, Turkey and Turkmenistan. In Canada, severe drought led to forecast wheat and canola crop production levels being 35%–40% below 2020 levels, while in the United States, the level of Lake Mead on the Colorado River fell in July to 47 m below full supply level, the lowest level on record.



The compounded effects of conflict, extreme weather events and economic shocks, further exacerbated by the COVID-19 pandemic, undermined decades of progress towards improving food security globally.



Hydro-meteorological hazards continued to contribute to internal displacement. The countries with the highest numbers of displacements recorded as of October 2021 were China (more than 1.4 million), Viet Nam (more than 664 000) and the Philippines (more than 600 000).

Foreword



The release of the World Meteorological Organization *State of the Global Climate 2021* report comes a few months after the release of the Working Group I, II and III contributions to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The present WMO report provides an update on the annual state of the climate observed in the year 2021, and shows continued trends (also reported in the IPCC reports) in terms of key indicators. These include concentrations of greenhouse gases, global annual mean surface temperature, global mean sea level, ocean heat content, ocean acidification, sea-ice extent and changes in mass of the ice sheets and glaciers. While the key indicators show that climate continues to change, information on socioeconomic impacts highlights the vulnerability of populations to current weather and climate events. Loss and damages of more than US\$ 100 billion, as well as severe impacts on food security and humanitarian aspects due to high-impact weather and climate events have been reported.

The increase in atmospheric concentration of CO₂ from 2019 to 2020 was slightly lower than that observed from 2018 to 2019, but higher

than the average annual growth rate over the last decade. This is despite a decrease in fossil fuel CO₂ emissions of approximately 5.6% in 2020 due to restrictions related to the COVID-19 pandemic.

Stabilizing global mean temperature at 1.5 °C to 2 °C above pre-industrial (1850–1900) levels by the end of this century will require an ambitious reduction of greenhouse gas emissions, which must accelerate during this decade.

Early warning systems are critically required across sectors for climate adaptation. However, less than half the Members report having early warning systems in place. WMO and its Members are working closely to substantially improve this situation in the near future.

I take this opportunity to congratulate the experts and the lead author, who compiled this report using physical data analyses and impact assessments. I thank all the contributors, particularly WMO Member National Meteorological and Hydrological Services and Regional Climate Centres and United Nations agencies, for their collaboration and input. The present report is intended to help our organizations to update world leaders and citizens on the latest information about the state of the Earth system, the weather and climate conditions in 2021, and the impacts of weather and climate events. WMO remains committed to supporting this publication and communicating it widely for this purpose.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Taalas'.

(Prof. Petteri Taalas)
Secretary-General

Global climate indicators

Global climate indicators¹ provide a broad view of climate change at a global scale, encompassing the composition of the atmosphere, energy changes, and the response of the land, ocean and ice. These indicators are closely interrelated. For example, the rise in CO₂ and other greenhouse gases in the atmosphere leads to an imbalance of energy and thus warming of the atmosphere and ocean. Warming of the ocean in turn leads to rising sea levels, to which is added the melting of ice on land in response to increasing atmospheric temperatures. The global indicators draw on a wide range of data sets that are listed at the end of the present report and which are based on multiple observing systems (see [Observational basis for climate monitoring](#)). Together, the indicators build a consistent picture of a warming world that touches all parts of the Earth system.

The connections between global climate indicators and the Sustainable Development Goals were highlighted in *Climate Indicators and Sustainable Development: Demonstrating the Interconnections* (WMO-No. 1271). That report traces the links and feedback loops among the key climate indicators as a physical system and the cascading risks to most of the 17 Sustainable Development Goals. Monitoring the global climate indicators, as well as their related risks and impacts, is therefore of critical importance for achieving the Sustainable Development Goals by 2030.

BASELINES

Baselines are specific periods, usually spanning one or more decades, that are used as a fixed period against which current conditions can be compared. A variety of baselines are

used in this report, and these are specified in the text and figures where appropriate.

Where possible, the WMO climatological standard normal, 1981–2010, is used as a baseline for consistent reporting.² For some indicators, however, it is not possible to use this baseline, due to either a lack of measurement during the whole period, or because a longer period is needed to calculate representative statistics.

There are two notable exceptions. Firstly, for global mean temperature, a baseline of 1850–1900 is used. This is the baseline used in recent IPCC reports (Sixth Assessment Report,³ Special Report: Global Warming of 1.5 °C⁴) as a reference period for pre-industrial temperatures, and is relevant for understanding progress relative to the goal of the Paris Agreement. Secondly, for greenhouse gases, atmospheric concentrations can be estimated much further back in time, using gas bubbles trapped in ice cores. The year 1750 is therefore used in this report to represent pre-industrial greenhouse gas concentrations.

GREENHOUSE GASES

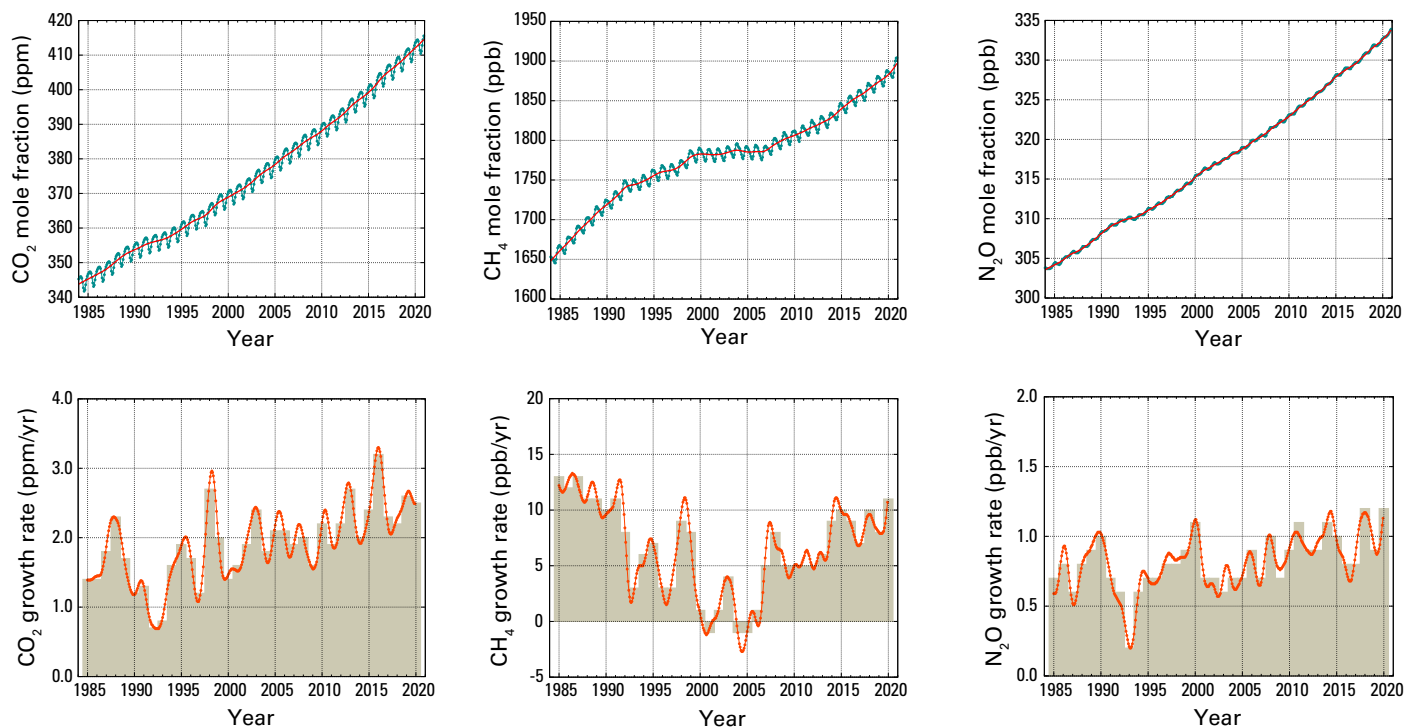
Atmospheric concentrations of greenhouse gases reflect a balance between emissions from human activities, natural sources, and sinks in the biosphere and ocean. Increasing levels of greenhouse gases in the atmosphere due to human activities have been the major driver of climate change since the mid-twentieth century. Global average mole fractions of greenhouse gases are calculated from in situ observations made at multiple sites in the Global Atmosphere Watch (GAW) Programme of WMO and partner networks.

¹ Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring, *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, *102*(1), E20–E37. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/1/BAMS-D-19-0196.1.xml>.

² 1981–2010 is used in preference to 1991–2020, for consistency with climate reports from WMO Members, not all of whom have yet transitioned to using the more recent period.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018: *IPCC Special Report: Global Warming of 1.5 °C*, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.



In 2020, greenhouse gas mole fractions reached new highs, with globally averaged surface mole fractions of carbon dioxide (CO₂) at 413.2 ± 0.2 parts per million (ppm), methane (CH₄) at 1889 ± 2 parts per billion (ppb) and nitrous oxide (N₂O) at 333.2 ± 0.1 ppb, respectively 149%, 262% and 123% of pre-industrial (1750) levels (Figure 1). The increase in atmospheric concentration in CO₂ from 2019 to 2020 was slightly lower than that observed from 2018 to 2019, but higher than the average annual growth rate over the last decade. This is despite a decrease in fossil fuel CO₂ emissions of approximately 5.6% in 2020 due to restrictions related to the COVID-19 pandemic.⁵ For CH₄ and N₂O, the increase from 2019 to 2020 was higher than that observed from 2018 to 2019 and also higher than the average annual growth rate over the last decade.

Real-time data from specific locations, including Mauna Loa (Hawaii) and Cape Grim (Tasmania) indicate that levels of CO₂, CH₄ and N₂O continued to increase in 2021.

Atmospheric methane (CH₄) increase is an issue of concern because it is not only a powerful greenhouse gas, but it is also a precursor of tropospheric ozone, with implications for human health, agriculture and ecosystems.⁶ The mean annual increase of CH₄ decreased from approximately 12 ppb per year during the late 1980s to nearly zero between 1999 and 2006. Since 2007, atmospheric CH₄ has been increasing, and in 2020 it increased by 11 ppb over 2019 levels. Studies using GAW CH₄ measurements indicate that increased CH₄ emissions from wetlands in the tropics and from anthropogenic sources at the mid-latitudes of the northern hemisphere are the likely causes of this recent increase.⁷ These studies have also pointed to the short-term climate benefits and cost-effectiveness of mitigating CH₄ emissions. Such mitigation measures were presented in the United Nations Environment Programme (UNEP) methane assessment⁸ and address major emitting sectors, namely oil and gas, agriculture and waste management.

Figure 1. Top row: Globally averaged mole fraction (measure of concentration), from 1984 to 2020, of CO₂ in parts per million (left), CH₄ in parts per billion (centre) and N₂O in parts per billion (right). The red line is the monthly mean mole fraction with the seasonal variations removed; the blue dots and line show the monthly averages. Bottom row: The growth rates representing increases in successive annual means of mole fractions are shown as grey columns for CO₂ in parts per million per year (left), CH₄ in parts per billion per year (centre) and N₂O in parts per billion per year (right). Source: WMO Global Atmosphere Watch.

⁵ https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science; https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21946

⁶ <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

⁷ Nisbet, E. G.; Manning, M. R.; Dlugokencky, E. J. et al. Very Strong Atmospheric Methane Growth in the 4 Years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. *Global Biogeochemical Cycles* **2019**, *33*(3), 318–342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.

⁸ <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

TEMPERATURE

The global mean temperature in 2021 was 1.11 ± 0.13 °C above the 1850–1900 average (Figure 2). The six data sets used in the analysis (see [Global temperature data](#)) place 2021 between the fifth and seventh warmest year on record globally, and all six show that the most recent seven years, 2015 to 2021, were the seven warmest years on record.

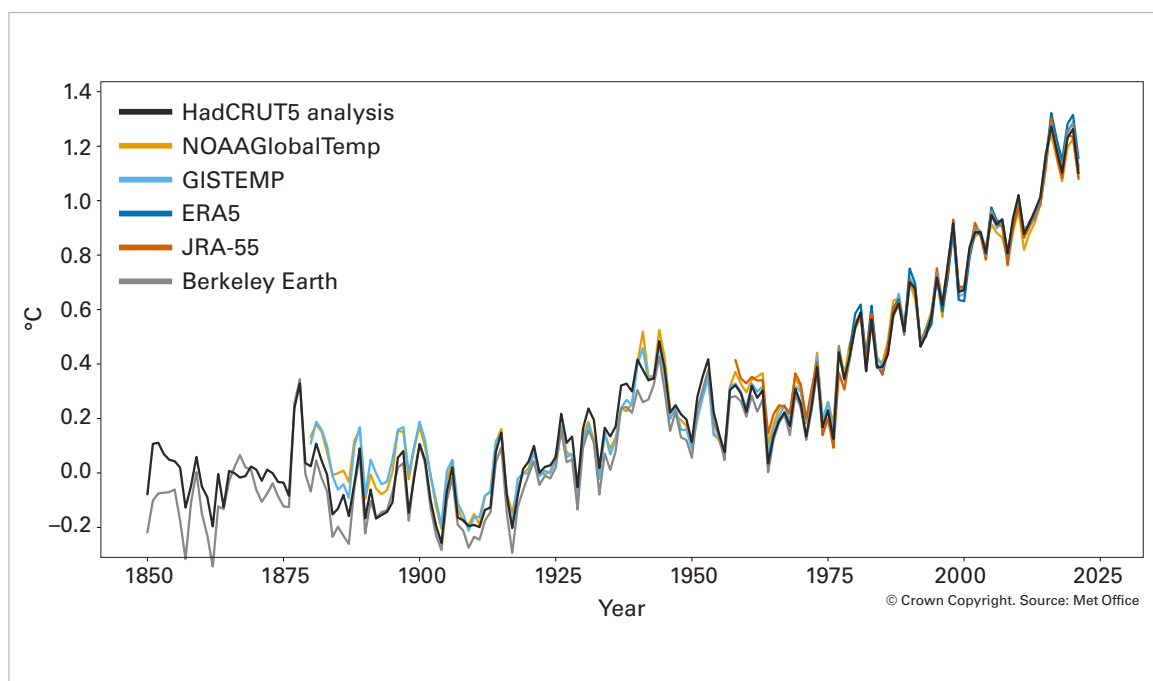
The year 2021 was less warm than some recent years due to the influence of moderate La Niña events at the start and end of the year, known as a “double-dip” La Niña (see [Drivers of short-term variability](#)). La Niña has a temporary cooling effect on the global mean temperature, which is strongest in the year following an event. Aside from the weak La Niña of 2018, the last significant La Niña event was in 2011. The year 2021 was around 0.22 °C to 0.29 °C warmer than 2011. The year 2016, which started during a strong El Niño,

remains the warmest year on record in most of the data sets surveyed.

The method for calculating global temperature anomalies relative to the 1850–1900 baseline has been updated from previous state of the global climate reports. The new method uses the assessment of temperature change and its uncertainties from the IPCC Sixth Assessment Report as a foundation for estimating changes since 1850–1900. Details are given in the section on [Global temperature data](#).

In the IPCC Sixth Assessment Report, Summary for Policymakers,⁹ temperature crossing points – the point at which long-term warming exceeds a particular level – were assessed using a 20-year average centred on the crossing point. For the period 2001–2020, the average was estimated¹⁰ to be 0.99 [0.84–1.10] °C. The provisional 20-year average for the period 2002–2021, based on

Figure 2. Global annual mean temperature difference from pre-industrial conditions (1850–1900) for six global temperature data sets (1850–2021). For details of the data sets and processing see [Data sets and methods](#). Source: Met Office, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.



⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

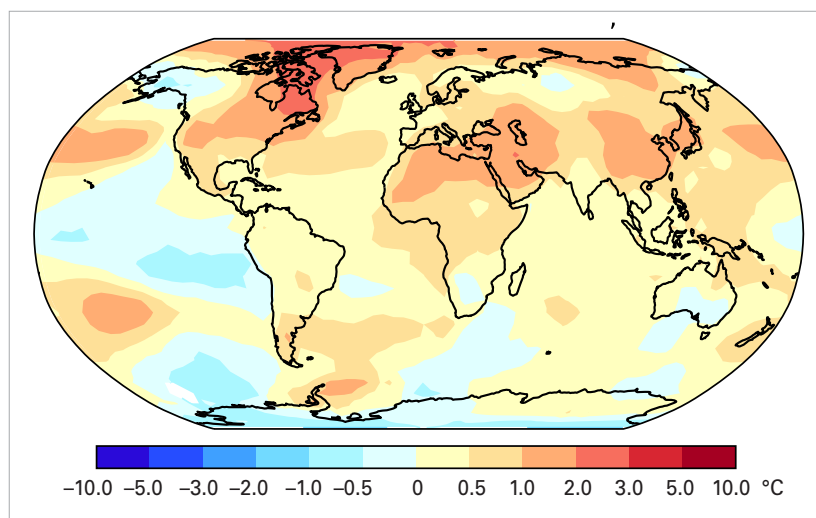
¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers, A.1.2. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. The IPCC average was based on four data sets: HadCRUT5, NOAA GlobalTemp—Interim, Berkeley Earth and Kadow, C.; Hall, D. M.; Ulbrich, U. Artificial Intelligence Reconstructs Missing Climate Information. *Nature Geoscience* **2020**, *13* (6), 408–413. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0582-5>. Bracketed values indicate the 5%–95% confidence range.

the average of the six data sets used in the present report, was 1.01 ± 0.12 °C above the 1850–1900 average.

Near-surface temperatures in 2021 were above the 1981–2010 average across a broad swath of North America and Greenland, Northern and Tropical Africa, the Middle East and Southern Asia (Figure 3). Areas with below-average temperatures included parts of Northern Asia, Australia, Southern Africa and North-west North America. The imprint of La Niña can clearly be seen in the Tropical Pacific. Cooler conditions in Southern Africa, India, and eastern Australia are characteristic of La Niña. The cooler-than-average area in Northern Asia stands in contrast to 2020, which saw exceptionally high temperatures in the region. This is partly associated with the different phases of the Arctic Oscillation in early 2020 (strongly positive) and early 2021 (strongly negative, see the section on [Arctic Oscillation \(AO\)](#)), which had an imprint on the average for the whole year.

OCEAN

Most of the excess energy that accumulates in the Earth system due to increasing concentrations of greenhouse gases is taken up by the ocean. The added energy warms the ocean, and the consequent thermal expansion of the water leads to sea-level rise, to which is added melting land ice. The surface layers of the ocean have warmed more rapidly than the interior, mirrored in the rise of global mean sea-surface temperature and in the increased incidence of marine heatwaves. As the concentration of CO₂ in the atmosphere increases, so too does the concentration of



CO₂ in the ocean. This affects ocean chemistry, lowering the average pH of the water, a process known as ocean acidification. All these changes have a broad range of impacts and interactions¹¹ in the ocean and coastal areas.

Figure 3. Near-surface temperature differences relative to the 1981–2010 average for 2021. The map shows the median anomaly calculated from five data sets: HadCRUT5, ERA5, GISTEMP, NOAA GlobalTemp and Berkeley Earth. *Source:* Met Office, United Kingdom.

OCEAN HEAT CONTENT

Increasing human emissions of CO₂ and other greenhouse gases cause a positive radiative imbalance at the top of the atmosphere – the Earth energy imbalance (EEI) – leading to an accumulation of energy in the form of heat in the Earth system which is driving global warming.^{12,13,14} Around 90% of this accumulated heat in the Earth system is stored in the ocean, which is measured through ocean heat content (OHC). A positive EEI signals that the Earth’s climate system is still responding to the current forcing¹⁵ and that more warming will occur even if the forcing does not increase further.¹⁶ This in turn is reflected in a continued increase of

¹¹ Gruber, N.; Boyd, P. W.; Frölicher, T. L. et al. Biogeochemical extremes and compound events in the ocean. *Nature* **2021**, *600*, 395–407. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03981-7>.

¹² Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P. et al. Earth’s energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2011**, *11* (24), 13421–13449. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011>.

¹³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: *Climate change 2013: The physical science basis*, Chapter 3, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

¹⁴ von Schuckmann, K.; Palmer, M. D.; Trenberth, K. E. et al. An imperative to monitor Earth’s energy imbalance. *Nature Climate Change* **2016**, *6*, 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>.

¹⁵ Hansen, J.; Nazarenko, L.; Ruedy, R. et al. Earth’s Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science* **2005**, *308* (5727), 1431–1435. <https://doi.org/10.1126/science.1110252>.

¹⁶ Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P. et al. Young people’s burden: requirement of negative CO₂ emissions. *Earth System Dynamics* **2017**, *8* (3), 577–616. <https://doi.org/10.5194/esd-8-577-2017>.

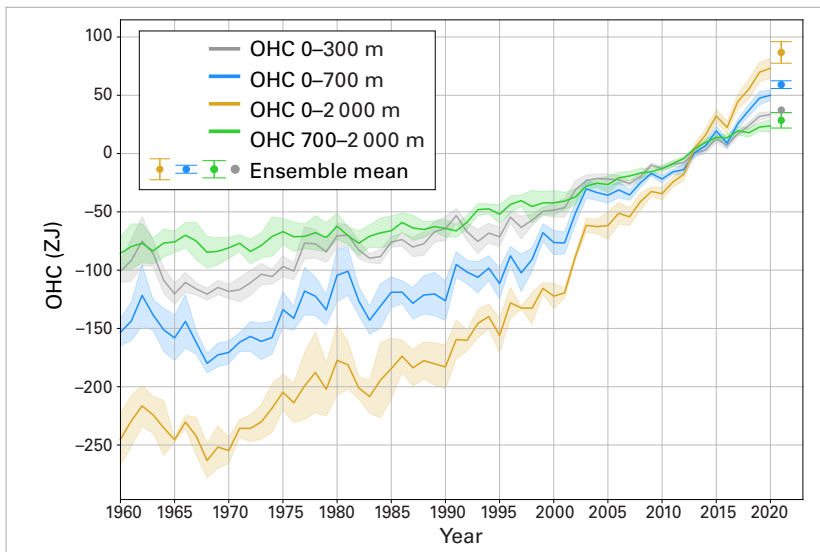


Figure 4. 1960–2021 ensemble mean time series and ensemble standard deviation (2 standard deviations, shaded) of global OHC anomalies relative to the 2005–2017 average for the 0–300 m (grey), 0–700 m (blue), 0–2 000 m (yellow) and 700–2 000 m (green) depth layers. The ensemble mean is an update of the outcome of a concerted international data and analysis effort (see footnote 24), and all products used are referenced in the section on [Ocean heat content data](#). Note that values are given for the ocean surface area between 60°S and 60°N and limited to the 300 m bathymetry of each product. The ensemble-mean OHC (0–2 000 m) anomalies for 2021 have been added as separate points, together with the ensemble spread, and are based on the four products listed in [Ocean heat content data](#). Source: Updated from von Schuckmann et al., 2016 (see footnote 22).

ocean heat content. The IPCC concluded that it is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land, and that it is extremely likely that human influence was the main driver of the ocean heat increase observed since the 1970s.¹⁷

Historical measurements of subsurface temperature back to the 1940s mostly rely on shipboard measurement systems, which constrain the availability of subsurface temperature observations at a global scale and

at depth.¹⁸ With the deployment of the Argo network of autonomous profiling floats, which first achieved its target near-global coverage in 2006, it is now possible to routinely measure OHC changes down to a depth of 2 000 m.^{19,20}

Various research groups have developed estimates of global OHC, and all results show continued ocean warming (Figure 4). Differences between the estimates at annual to decadal scale arise from the various statistical treatments of data gaps, the choice of climatology and the approach used to account for instrumental biases.^{21,22,23} A concerted effort has been established to provide an international view on the global evolution of ocean warming up to the year 2021.²⁴

The upper 2 000 m depth of the ocean continued to warm in 2021 and it is expected that it will continue to warm in the future – a change which is irreversible on centennial to millennial timescales.^{25,26} The ocean heat content in 2021 was the highest on record, exceeding the 2020 value by 14 ± 9 ZJ (Figure 4). All data sets agree that ocean warming rates show a particularly strong increase in the past two decades. Ocean warming rates for the 0–2 000 m depth layer (relative to the ocean surface) reached $1.0 (0.6) \pm 0.1$ W m⁻²

¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

¹⁸ Abraham, J. P.; Barlinger, M.; Bindoff, N. L. et al. A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change. *Reviews of Geophysics* **2013**, *51* (3), 450–483. <https://doi.org/10.1002/rog.20022>.

¹⁹ Riser, S. C.; Freeland, H. J.; Roemmich, D. et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change* **2016**, *6* (2), 145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.

²⁰ Roemmich, D.; Alford, M. H.; Claustre, H. et al. On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science* **2019**, *6*, 439. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00439>.

²¹ Boyer, T.; Domingues, C. M.; Good, S. A. et al. Sensitivity of Global Upper-Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies. *Journal of Climate* **2016**, *29* (13), 4817–4842. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0801.1>.

²² von Schuckmann, K.; Palmer, M. D.; Trenberth, K. E. et al. An imperative to monitor Earth’s energy imbalance. *Nature Climate Change* **2016**, *6*, 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>.

²³ Cheng, L.; Abraham, J.; Goni, G. et al. XBT Science: Assessment of Instrumental Biases and Errors. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2016**, *97* (6), 924–933. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/6/bams-d-15-00031.1.xml>.

²⁴ von Schuckmann, K.; Cheng, L.; Palmer, M. D. et al. Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth System Science Data* **2020**, *12* (3), 2013–2041. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>.

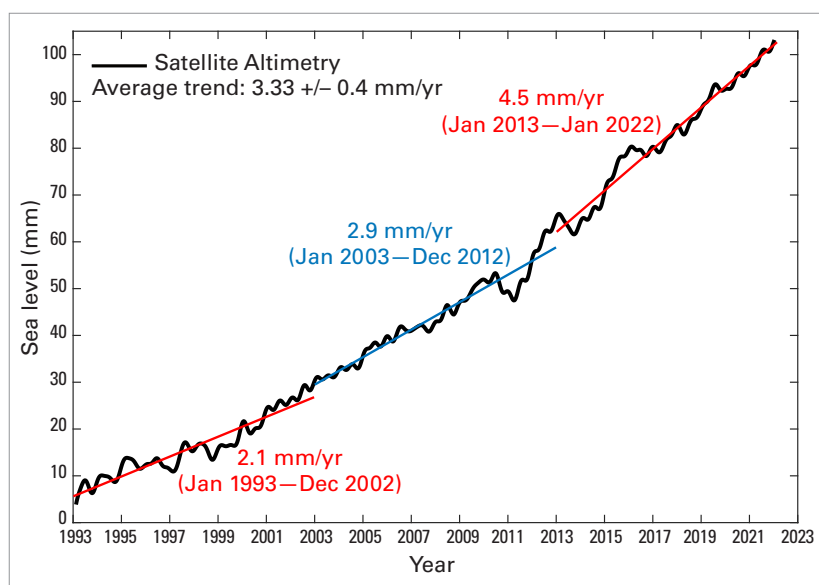
²⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

²⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01_SROCC_SPM_FINAL.pdf.

over the period 2006–2021 (1971–2021). For comparison, the values for the upper 700 m depth amount to $0.7 (0.4) \pm 0.1 \text{ W m}^{-2}$ over the period 2006–2021 (1971–2021). Below the 2 000 m depth, the ocean also warmed, albeit at the lower rate²⁷ of $0.07 \pm 0.04 \text{ W m}^{-2}$.

SEA LEVEL

Global mean sea level (GMSL) integrates changes occurring in many components of the climate system. On interannual to multidecadal time scales, changes to GMSL result from ocean warming via thermal expansion of sea water, melting of land ice and exchange of water with water bodies on land. Measured since the early 1990s by high-precision altimeter satellites, the GMSL rose by 2.1 mm per year between 1993 and 2002, and by 4.5 mm per year between 2013 and 2021, an increase by a factor of two between the periods, mostly due to the accelerated loss of ice mass from the ice sheets.²⁸ In 2021, GMSL reached a new record high. Compared to previous El Niño and La Niña years (for example, in 1997/1998, 2010/2011, 2015/2016), during which the GMSL displayed temporary positive or negative anomalies of several millimetres, 2021 was marked by an increase of the GMSL that was close to the long-term trend (Figure 5).



Although sea level has risen almost everywhere since 1993, it has not risen equally everywhere. Regional patterns of sea-level change are dominated by local changes in ocean heat content and salinity. Several regions continue to be affected by a rate of sea-level rise substantially faster than the global mean (see Figure 6, which shows the difference between local and global sea level). This is particularly the case in the western Tropical Pacific, the South-west Pacific, the North Pacific, the South-west Indian Ocean and the South Atlantic. In other regions, local

Figure 5. Global mean sea level evolution from January 1993 to January 2022 (black curve) based on high-precision satellite altimetry. The coloured straight lines represent the average linear trend over three successive time spans (January 1993 to December 2002; January 2003 to December 2012; January 2013 to January 2022). Source: AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).

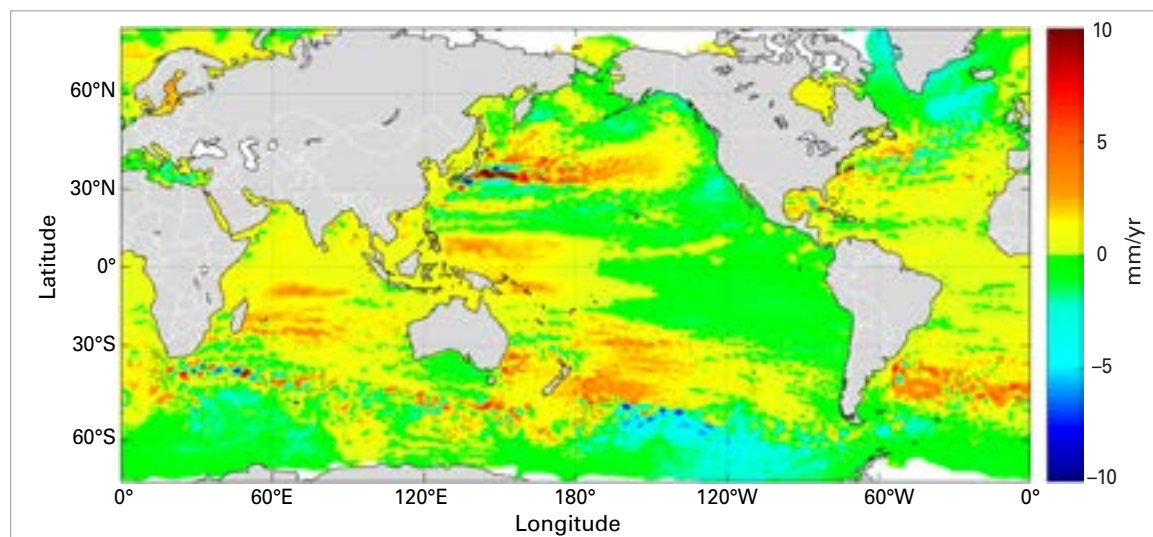
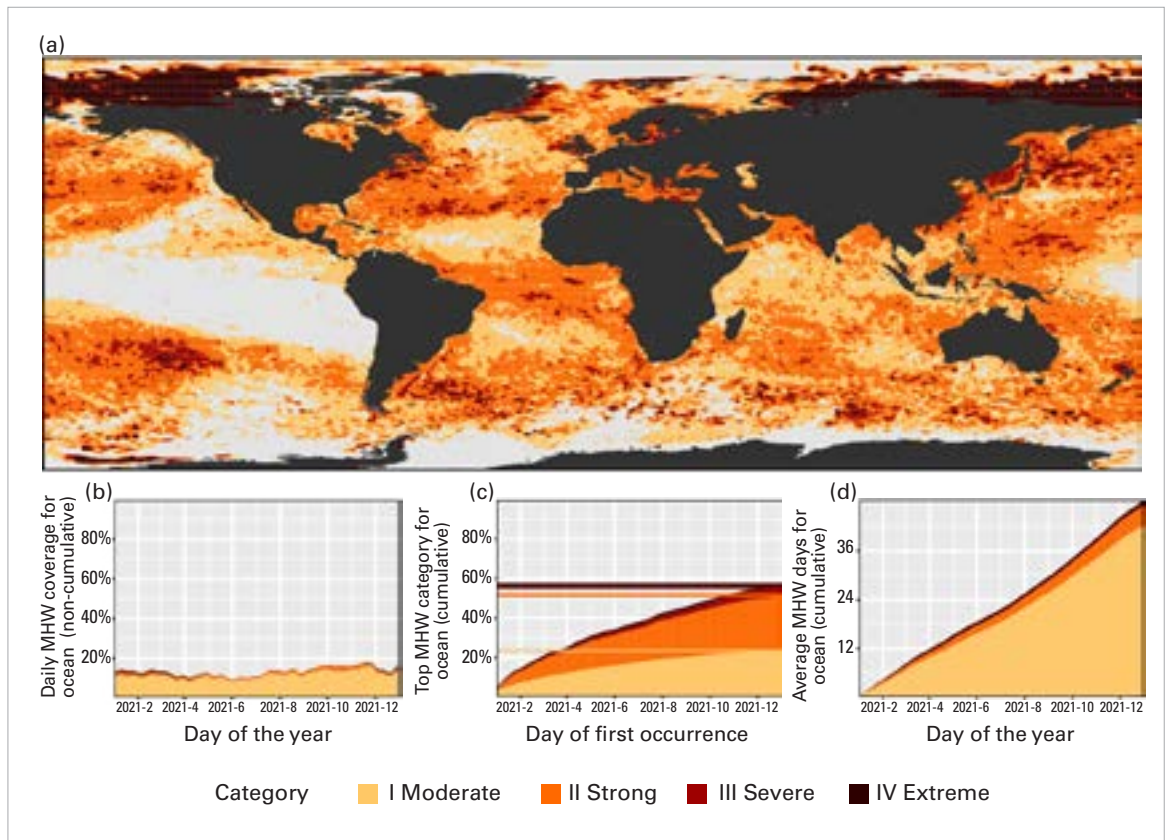


Figure 6. Regional trend patterns in sea level after the global mean trend has been removed (mm/yr), from 1993 to 2020, based on satellite altimetry. Note that the actual sea level has increased almost everywhere. Source: Copernicus Climate Change Service (<https://climate.copernicus.eu>).

²⁷ Update from Purkey, S. G.; Johnson, G. C. Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets. *Journal of Climate* **2010**, *23*, 6336–6351. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3682.1>.

²⁸ WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data* **2018**, *10* (3), 1551–1590, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.

Figure 7. (a) Global map showing the highest MHW category (for definitions, see [Marine heatwave and marine cold spell data](#)) experienced at each pixel in 2021 (reference period 1982–2011). Light grey indicates that no MHW occurred in a pixel over the entire year. (b) Stacked bar plot showing the percentage of the surface of the ocean experiencing an MHW on any given day of the year. (c) Stacked bar plot showing the cumulative percentage of the surface of the ocean that experienced an MHW over the year. Note: These values are based on when in the year a pixel first experienced its highest MHW category, so no pixel is counted twice. Horizontal lines in this figure show the final percentages for each category of MHW. (d) Stacked bar plot showing the cumulative number of MHW days averaged over the surface of the ocean. Note: This average is calculated by dividing the cumulative sum of MHW days per pixel weighted by the surface area of those pixels. Data are from the National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (NOAA OISST).
Source: Robert Schlegel.



sea level has risen more slowly than the global mean, such as around Greenland and south of Iceland, and in the Southern Ocean around Antarctica. The patterns of trends in sea level have only varied a little over the last 30 years of the altimetry era, and changes from one year to another are small.

MARINE HEATWAVES AND COLD SPELLS

Analogous to heatwaves and cold spells on land, marine heatwaves (MHW) and marine cold spells (MCS) are prolonged periods of extreme heat or cold that affect the ocean. They can have a range of consequences for marine life and dependent communities,²⁹ and MHWs have become more frequent over the twentieth century. Satellite retrievals of sea-surface temperature are used to monitor MHWs and MCSs, categorized here as moderate, strong, severe or extreme (for definitions, see [Marine heatwave and marine cold spell data](#)).

Much of the ocean experienced at least one “strong” MHW at some point in 2021 (Figure 7). Due to the below-average sea-surface temperatures associated with the double-dip La Niña (see [El Niño–Southern Oscillation \(ENSO\)](#)), MHWs were conspicuously absent in the eastern Equatorial Pacific Ocean, which was also one of the only regions of the global ocean to see broad coverage of MCSs (Figure 8). The Laptev and Beaufort Seas experienced “severe” and “extreme” MHWs from January to April 2021. The ice-edge regions to the east of Greenland (August), north of Svalbard (October), and east of the Ross Sea (December) experienced notable “extreme” MHWs. In 2021, almost all MCSs were “moderate”, except in areas of high variability such as the poleward extension of the Gulf Stream.

MHWs in 2021 showed an average daily coverage of 13%, which is less than the record of 17% in 2016 and 16% in 2020. For the eighth

²⁹ Smale, D. A.; Wernberg, T.; Oliver, E. C. J. et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change* **2019**, *9* (4), 306–312. <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0412-1>.

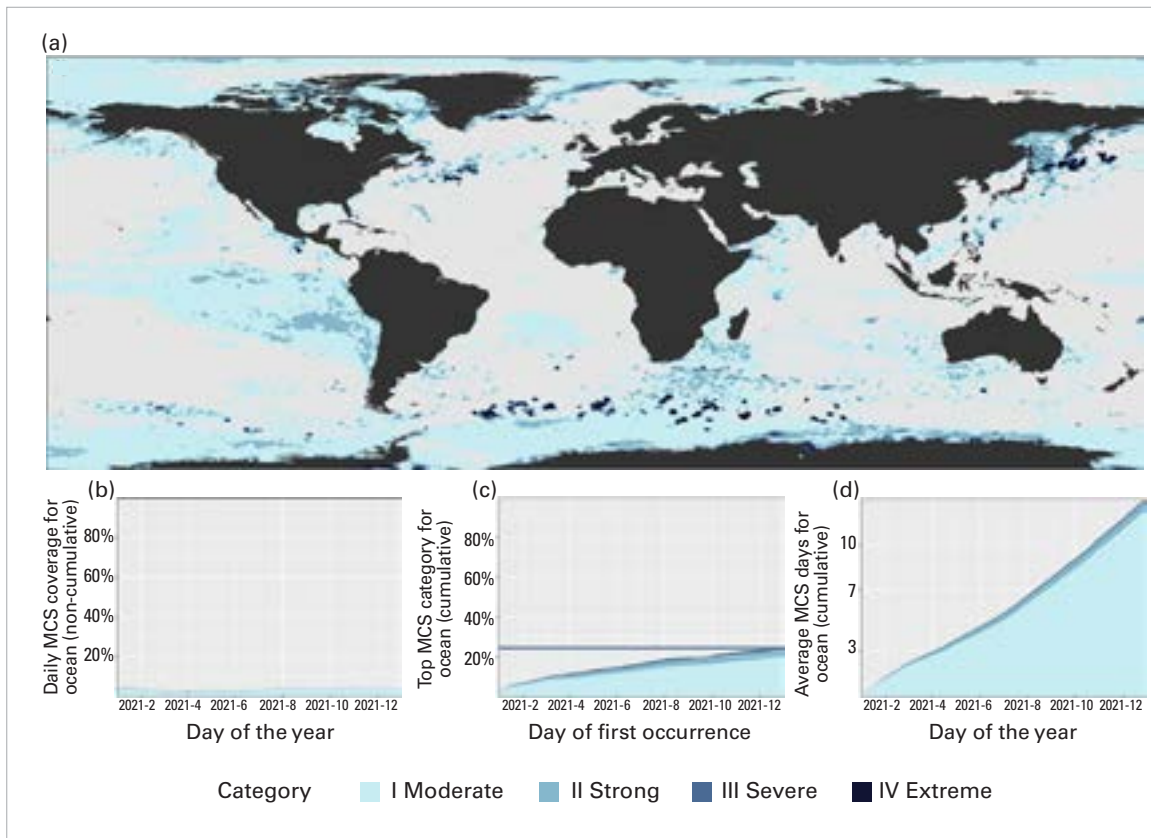


Figure 8. As for Figure 7, but showing MCSs rather than MHWs. Data are from the National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (NOAA OISST). Source: Robert Schlegel.

consecutive year, the most common category of MHW in 2021 was “strong” (28%). Overall, 57% of the ocean surface experienced at least one MHW during 2021 (Figure 7c) – less than the record of 65% in 2016, and the lowest annual coverage since 2012 (57%).

The average daily coverage of the global ocean by MCSs in 2021 was 4% (Figure 8b) – a lower value than the record high in 1982 (7%) and comparable to 2020 (4%). In total, 25% of the ocean surface experienced at least one MCS during 2021 (Figure 8c), which is comparable to 2020 (25%), but much less than the 1985 record (63%).

OCEAN ACIDIFICATION

The ocean absorbs around 23% of the annual emissions of anthropogenic CO₂ into the atmosphere.^{30,31} While this slows the rise of atmospheric concentration of CO₂,³² CO₂ reacts with seawater and reduces the pH of the ocean,³³ a process known as ocean acidification (Figure 9). The current global rate of ocean acidification exceeds, by at least an order of magnitude, the rates inferred for the Paleocene–Eocene thermal maximum (PETM), which occurred around 56 million years ago and was associated with large perturbations of the global carbon cycle.³⁴ The IPCC Sixth

³⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01_SROCC_SPM_FINAL.pdf.

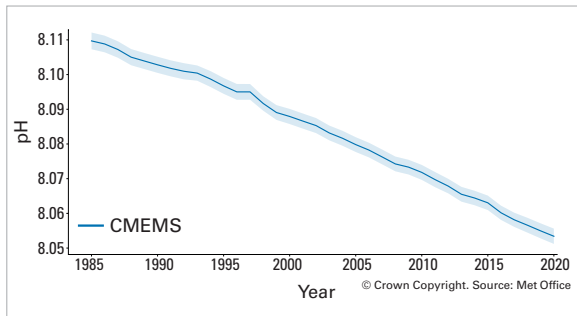
³¹ World Meteorological Organization (WMO). WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No.15: *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018*. Geneva, 2019.

³² Le Quéré, C.; Andrew, R. M.; Friedlingstein, P. et al. Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data* **2018**, *10*, 405–448. <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.

³³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>.

³⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Chapter 2, section 2.3.3.5 Ocean pH, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

Figure 9. Global mean ocean surface pH (blue) covering the period 1985–2020. The shaded area indicates the estimated uncertainty in each estimate. Data from Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Source: Met Office, United Kingdom.



Assessment Report concluded that “[t]here is *very high confidence* that open ocean surface pH is now the lowest it has been for at least 26 kyr and current rates of pH change are unprecedented since at least that time”. As the pH of the ocean decreases, its capacity to absorb CO₂ from the atmosphere also declines.³⁵

Ocean acidification threatens organisms and ecosystem services, and hence food security, tourism and coastal protection. Local and regional acidification is of great relevance to marine organisms and biological processes. However, there is high variability in coastal areas due to a range of factors affecting CO₂ levels. National data sets of ocean acidification observations submitted towards the Sustainable Development Goal (SDG) 14.3 and the associated SDG Indicator 14.3.1 (“Average marine acidity (pH) measured at agreed suite of representative sampling

stations”) highlight the need for sustained, repeated observation and measurement of ocean acidification along the coastlines and in the open ocean. While there are currently still gaps in the global coverage, capacity building efforts increase the capability of many nations to measure, manage and report ocean acidification data, as confirmed by the growing number of countries participating in data collection towards the SDG Indicator 14.3.1.

CRYOSPHERE

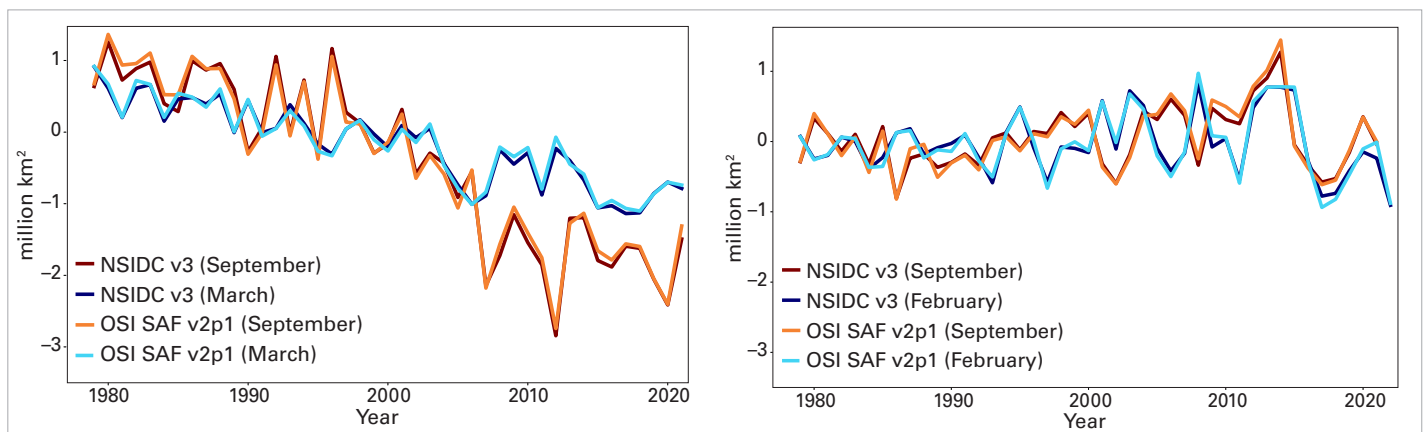
The cryosphere comprises the frozen parts of the Earth. This includes sea ice, glaciers, ice sheets, snow and permafrost.

SEA ICE

Arctic sea ice

The 2020/2021 Arctic winter saw anomalously high sea-level pressure over the central Arctic Ocean (see [Arctic Oscillation \(AO\)](#)). The resulting anticyclonic wind pattern drove thicker multi-year ice into the Beaufort Sea.³⁶ The maximum Arctic sea-ice extent for the year was reached³⁷ on 21 March, at 14.8 million km². March 2021 was the ninth or tenth lowest extent on record (1979–2021), depending on the data source (Figure 10). For more details on the data sets used, see [Sea-ice data](#).

Figure 10. Sea-ice extent difference from the 1981–2010 average in the Arctic (left) and Antarctic (right) for the months with maximum ice cover (Arctic: March; Antarctic: September) and minimum ice cover (Arctic: September; Antarctic: February) from 1979 to 2021. Source: Data from EUMETSAT OSI SAF v2p1 and National Snow and Ice Data Centre (NSIDC) v3 (Fetterer et al., 2017) (see reference details in [Sea-ice data](#)).



³⁵ Middelburg, J. J.; Soetaert, K.; Hagens, M. Ocean Alkalinity, Buffering and Biogeochemical Processes. *Reviews of Geophysics* **2020**, *58*, e2019RG000681. <https://doi.org/10.1029/2019RG000681>.

³⁶ Mallett, R. D. C.; Stroeve, J. C.; Cornish, S. B. et al. Record winter winds in 2020/21 drove exceptional Arctic sea ice transport. *Communications Earth & Environment* **2021**, *2*, 149. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00221-8>.

³⁷ <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/03/arctic-sea-ice-reaches-uneventful-maximum>

Melt rates were close to the 1981–2010 average early in the melt season. However, sea-ice extent decreased very rapidly in June and early July in the Laptev Sea and east Greenland Sea regions. As a result, the Arctic-wide sea-ice extent reached a record low for the time of year in the first half of July. The monthly July average was the second to fourth lowest on record (tied with 2012 and 2019), with strong regional contrasts³⁸ (Figure 11). More ice than normal (1981–2010) was found in the Beaufort and Chukchi Seas, but the Siberian and European sectors (Laptev Sea and East Greenland Sea) had much less sea ice than normal. One exception was the eastern Kara Sea, where some sea ice persisted for the whole season. Conditions shifted rapidly after July, with a sustained period of colder weather across the Arctic Ocean. This slowed the sea-ice melt and August 2021 ended up with the tenth lowest extent on record.

With the slowdown in melt in August, the minimum September extent was greater than in recent years but still well below the 1981–2010 average, representing the twelfth lowest minimum ice extent in the 43-year satellite record (Figure 10). The 2021 minimum extent was observed³⁹ on 16 September at 4.72 million km², while the mean September ice extent was 4.92 million km², well below the 1981–2010 average.

Antarctic sea ice

Sea-ice extent across the Southern Ocean in 2021 was generally below the 1981–2010 mean, with below-average extents before the February minimum, slightly above-average extents during most of the winter, an exceptionally early maximum ice extent at the end of August, and the establishment of extents that were well below average by the end of the year.

The minimum in the 2021 annual cycle occurred on 19 February, when sea ice covered 2.60 million km², the fifteenth lowest extent in the record (1979–present). The extent of

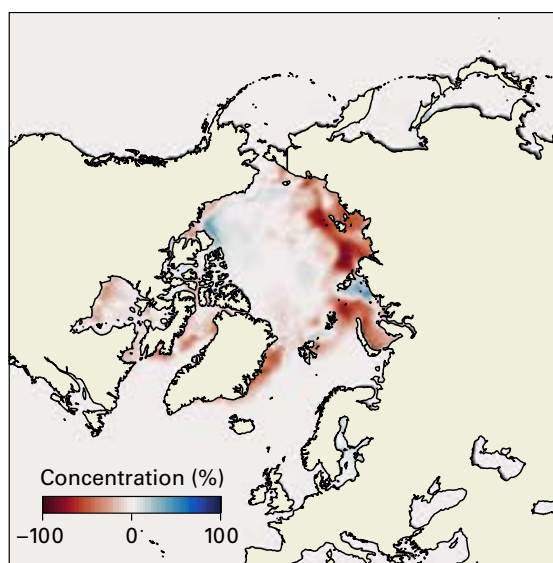


Figure 11. Arctic sea-ice concentration anomalies for July 2021 (difference from the 1981–2010 average). Red represents areas with less ice than normal, blue represents more ice. Source: EUMETSAT OSI SAF data with research and development input from the European Space Agency Climate Change Initiative (ESA CCI).

ice at the annual minima began to increase in magnitude in the early 1990s, reaching a maximum of 3.68 million km² in 2013, before dropping sharply to 2.08 million km² in 2017, the lowest ice extent in the period 1979–2021. Since then, the extents at the annual minima have increased slowly. In February, most Antarctic sea ice was found in the Weddell Sea and therefore the sea-ice extents at the annual minima largely reflect regional changes in that area.

Antarctic sea ice reached its maximum annual extent of 18.80 million km² on 30 August 2021. This was close to the average magnitude in terms of extent, and the twenty-second largest in the 43 years of data. However, this was the second earliest maximum, with only one other maximum having occurred in August (that of 2016).

After the middle of September, the sea-ice extent for the whole Southern Ocean was persistently below average, with the ice extent decreasing to 6.77 million km² (–1.82 million km² below average) on 24 December, the third lowest for that day in the record. At that time, ice extents were below average in all sectors around the continent, but the lack of ice in the Weddell, Bellingshausen and Ross Seas had the greatest impact on the Antarctic-wide anomaly.

³⁸ Sea-ice cover for July 2021: <https://climate.copernicus.eu/sea-ice-cover-july-2021>

³⁹ <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/09/arctic-sea-ice-at-highest-minimum-since-2014>

GLACIERS

Glaciers are formed from snow that has compacted to form ice, which can deform and flow downhill to lower and warmer altitudes, where it melts. If the glacier terminates in a lake or the ocean, ice loss also occurs through melting, where ice and water meet, or by calving of the glacier front to form icebergs. Glaciers are sensitive to changes in temperature, precipitation and sunlight, as well as other factors, such as changes in basal lubrication, warming ocean waters or the loss of buttressing ice shelves.

Over the period 2000–2019, global glaciers and ice caps (excluding the Greenland and Antarctic ice sheets) experienced⁴⁰ an average mass loss of 267 ± 16 Gt per year. Mass loss was higher, at 298 ± 24 Gt per year, in the later part of the period from 2015–2019. Glaciers in several mid-latitude regions thinned at more than double the global average (0.52 ± 0.03 m per year) from

2015 to 2019. Examples include thinning of 1.52 m per year in New Zealand, 1.24 m per year in Alaska, 1.11 m per year in Central Europe, and 1.05 m per year in Western North America (not including Alaska).

The World Glacier Monitoring Service collates and analyses global glacier mass balance data, including a set of 42 reference glaciers with long-term observations. For the glaciological year 2020/2021, preliminary data available from 32 of these reference glaciers indicate an average global mass balance of -0.77 m water equivalent (m w.e.⁴¹ Figure 12). This is a smaller mass loss than the average for the last decade (-0.94 m w.e. from 2011 to 2020), but is larger than the average mass loss for the period 1991–2020, -0.66 m w.e.

Although the glaciological year 2020/2021 was characterized by a less negative glacier mass balance than in recent years, there is a clear trend towards an acceleration of mass loss on multidecadal timescales (Figure 12). On average, the reference glaciers have thinned by 33.5 m (ice equivalent) since 1950, with 76% of this thinning (25.5 m) occurring since 1980.

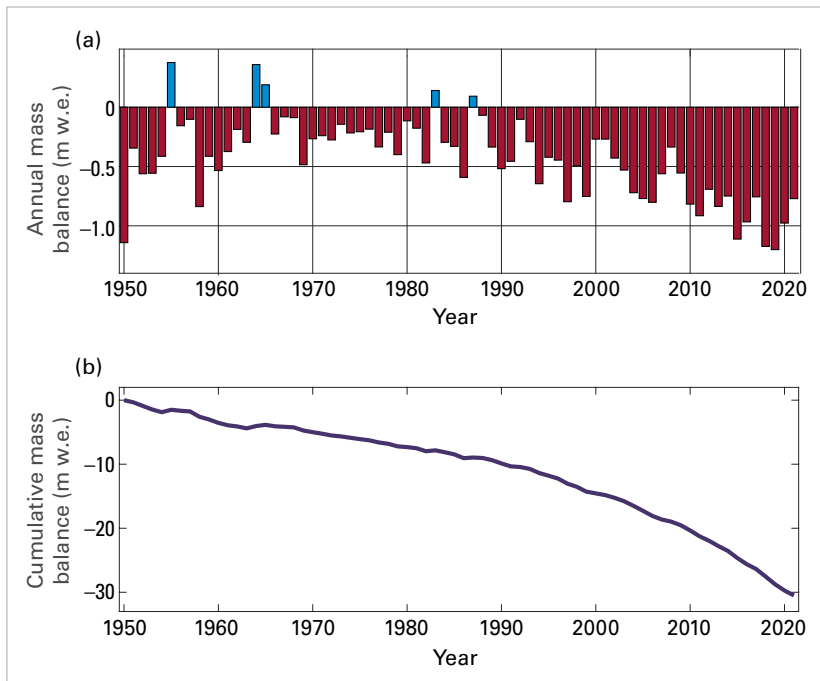
Exceptional glacier mass loss in western Canada

Mass loss from North American glaciers accelerated over the last two decades. Glacier mass loss in Western North America increased from 53 ± 13 Gt per year for the period 2000–2004 to 100 ± 17 Gt per year for 2015–2019.⁴²

An exceptionally warm, dry northern hemisphere summer in 2021 (see [Heatwaves and wildfires](#)) exacerbated mass loss for most glaciers in Alberta and southern British Columbia in Canada, and the Pacific Northwest of the United States of America. In the Coast Mountains of British Columbia, Place and Helm Glaciers lost more mass during the period 2020–2021 than in any year since

Figure 12. Global glacier mass balance 1950–2021, from a set of approximately 40 global reference glaciers.

(a) Average annual mass balance for the set of reference glaciers. (b) Cumulative mass balance since 1950. Units are m w.e. Source: Data are provided by the World Glacier Monitoring Service, <http://www.wgms.ch>.



⁴⁰ Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* **2021**, *592* (7856), 726–731. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03436-z>.

⁴¹ Metres water equivalent is the depth of water that would result if the lost ice were melted and spread across the surface area of the glacier.

⁴² Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* **2021**, *592* (7856), 726–731. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03436-z>.

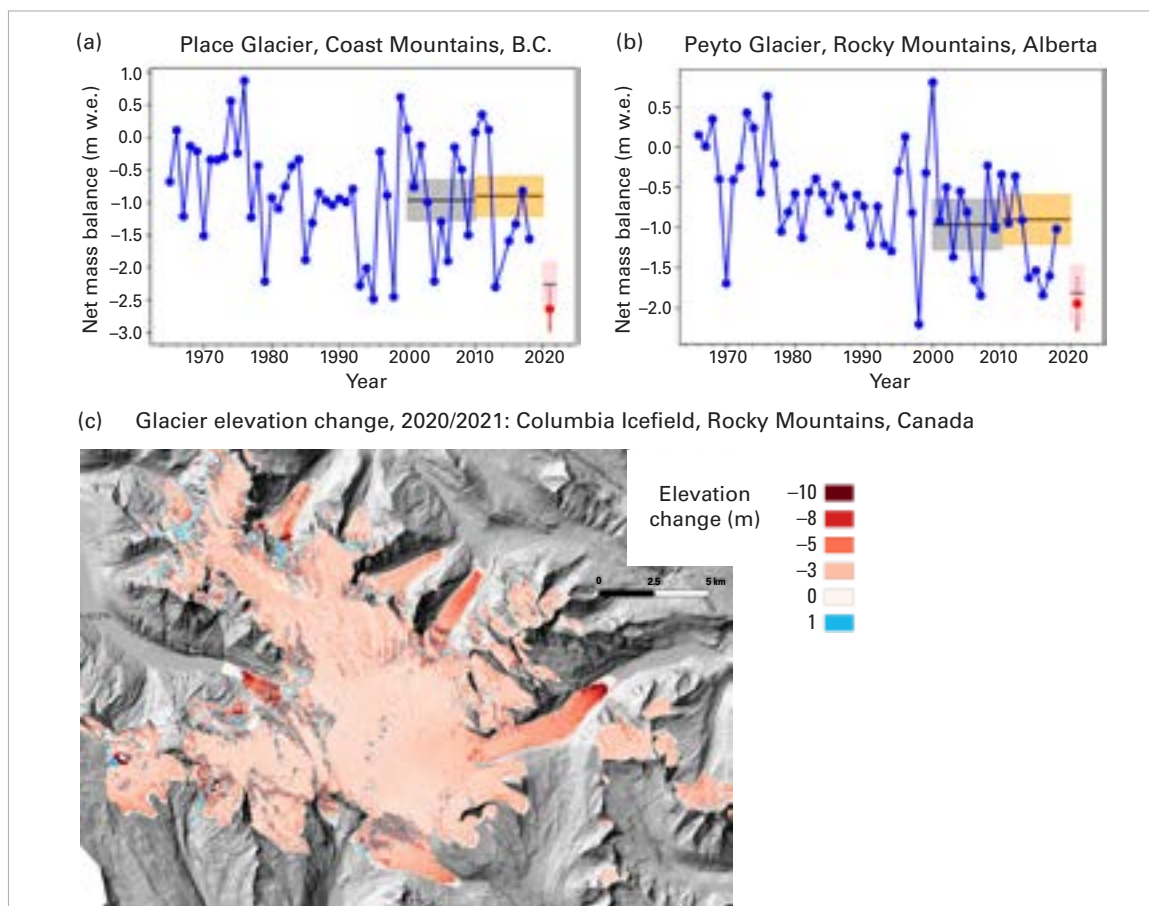


Figure 13. Glacier mass balance records from (a) Place Glacier, British Columbia, and (b) Peyto Glacier, Alberta from 1965 to 2021. Data for 1965–2019 are from the World Glacier Monitoring Service. Mass balance estimates for 2021 are from LiDAR surveys, with firn-density corrections based on Pelto et al. (2019) (see [Glacier mass balance data](#)). The blue and yellow horizontal bars indicate decadal mean values for the region from Hugonnet et al. (2021) (see [Glacier mass balance data](#)). Data from 2021 indicate the uncertainty (pink bar), the mass balance calculation using the contemporaneous LiDAR-derived glacier area (red circles), and the specific mass balance calculated from the Randolph Glacier Inventory glacier areas/outlines as used by Hugonnet et al. (2021) (black crosshairs). (c) LiDAR-derived elevation change on the Columbia Icefield, Canadian Rocky Mountains, for the 2020/2021 mass balance year.

measurements began in 1965 (Figure 13a). In the Canadian Rocky Mountains, mass loss from Peyto Glacier was the second greatest since 1965, after the strong El Niño year of 1998 (Figure 13b). Repeat LiDAR surveys⁴³ indicate mass balances of -2.66 , -3.30 , and -1.95 m w.e. on Place, Helm and Peyto Glaciers, respectively. This represents roughly twice the mean regional rate of thinning from 2015 to 2019.

Little snow remained on most of the mountain glaciers in this region by mid-August 2021, and many of these glaciers have lost their firn zone, where multi-year snow undergoes the transformation from snow to glacial ice. Particulate deposition – including soot and ash – from extensive regional wildfire activity in summer 2021 meant that the surfaces of the glaciers were unusually dark in July and August and absorbed more sunlight

than usual, contributing to the extreme mass loss. Kokanee Glacier, British Columbia, lost 5%–6% of its total volume in 2021, while Columbia Icefield, the largest icefield in the Rocky Mountains (210 km²), lost about 0.34 Gt of ice (Figure 13c).

ICE SHEETS

Ice sheets are expanses of glacial ice that cover an area larger than 50 000 km². In the current climate, there are two ice sheets, found on Greenland and Antarctica.

Greenland ice sheet

Changes in the total mass balance of the Greenland ice sheet reflect the combined effects of: surface mass balance, defined as the difference between snowfall and meltwater

⁴³ Pelto, B. M.; Menounos, B.; Marshall, S. J. Multi-year evaluation of airborne geodetic surveys to estimate seasonal mass balance, Columbia and Rocky Mountains, Canada. *The Cryosphere* **2019**, *13*, 1709–1727. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1709-2019>.

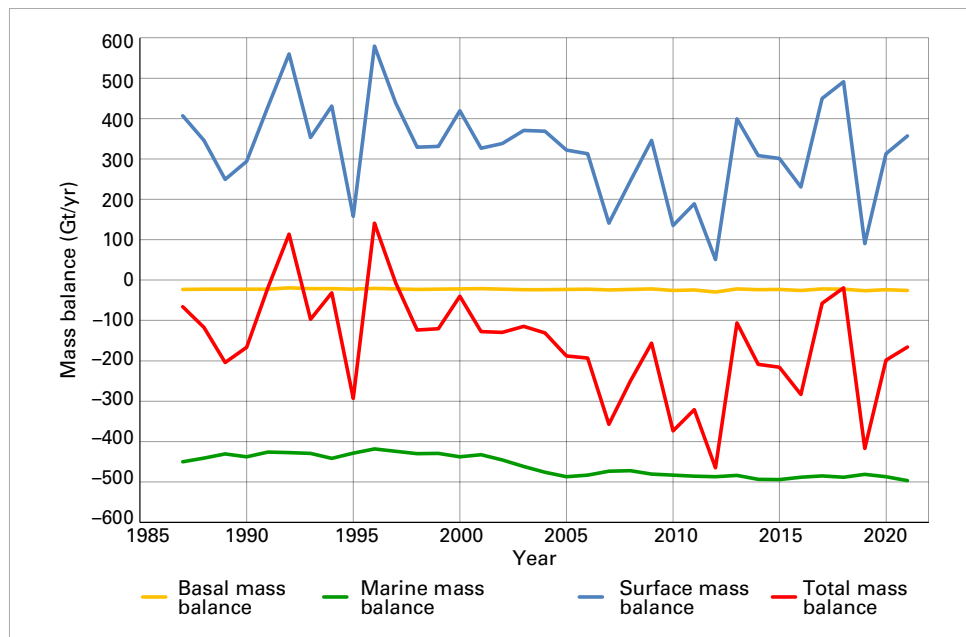
run-off from the ice sheet; the marine mass balance, which is the sum of mass losses at the periphery from the calving of icebergs and the melting of glacier tongues on contact with the ocean; and the basal mass balance, which consists of basal melting due to geothermal heat and frictional heat generated by sliding at the base of the glacier and by deformation of the ice.

For Greenland, an ensemble of regional climate models⁴⁴ gives an estimated total mass balance⁴⁵ of -166 Gt for the 2021 mass balance year (1 September 2020 to 31 August 2021). Estimates based on satellite observations and the PROMICE surface weather station network give a total mass balance of -85 Gt over

the same period.⁴⁶ GRACE satellite gravity data processed by NASA⁴⁷ give a total mass balance of -126 Gt for this same period.⁴⁸ The estimated magnitude of mass loss differs due to different methods and assumptions, but there is agreement that the Greenland ice sheet had a negative mass balance for the twenty-fifth year in a row.

Over the period September 1986 to August 2021, climate modelling indicates that the Greenland ice sheet lost a total of $5\,511$ Gt of ice,⁴⁹ an average mass loss of 157 Gt per year (Figure 14). Mass loss has accelerated over the past two decades. Based on the GRACE and GRACE-FO satellite gravity data,⁵⁰ Greenland lost $5\,151$ Gt of ice from April 2002

Figure 14. Components of the total mass balance of the Greenland ice sheet 1987–2021. Blue: surface mass balance (SMB); green: marine mass balance (MMB, also referred to as discharge); orange/yellow: basal mass balance (BMB), red: total mass balance (TMB), the sum of SMB, MMB and BMB (see footnote 44).
 Source: Mankoff, K. D.; Solgaard, A.; Colgan, W. et al. Greenland Ice Sheet solid ice discharge from 1986 through March 2020. *Earth System Science Data* **2020**, *12*(2), 1367–1383. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1367-2020>.



⁴⁴ Based on the average of three regional climate and mass balance models. See Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week. *Earth System Science Data* **2021**, *13*, 5001–5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.

⁴⁵ A negative mass balance indicates a loss of ice mass; a positive mass balance indicates a gain.

⁴⁶ Moon, T. A.; Tedesco, M.; Box, J. E. et al. Greenland Ice Sheet. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/546g-ms61>.

⁴⁷ <https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/>.

⁴⁸ Wiese, D.N.; Yuan, D.-N.; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

⁴⁹ Based on the average of three regional climate and mass balance models. See Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week. *Earth System Science Data* **2021**, *13*, 5001–5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.

⁵⁰ Wiese, D.N.; Yuan, D.-N.; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

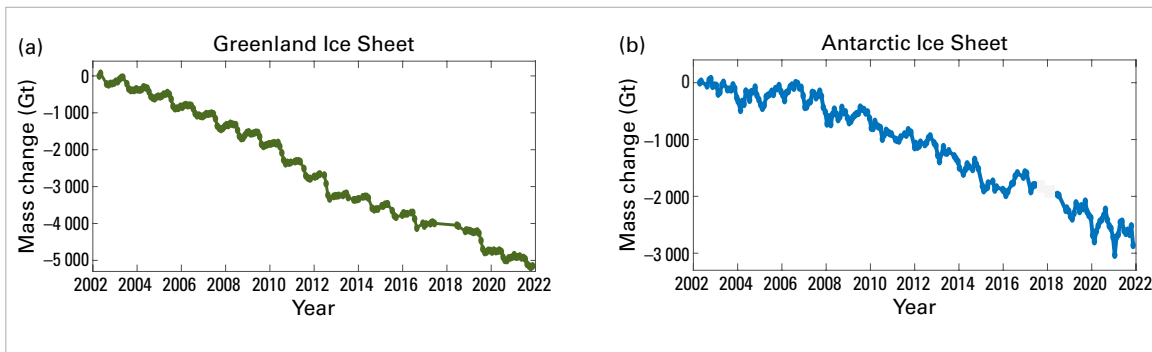


Figure 15. GRACE and GRACE-FO satellite gravity data of Greenland and Antarctic ice sheet mass change from April 2002 to November 2021 (see footnote 48). The Greenland ice sheet lost mass at an average rate of 276 Gt per year over this period, while the average rate of mass loss in Antarctica was 152 Gt per year. Combined, this is equivalent to about 1.2 mm per year of global sea-level rise.

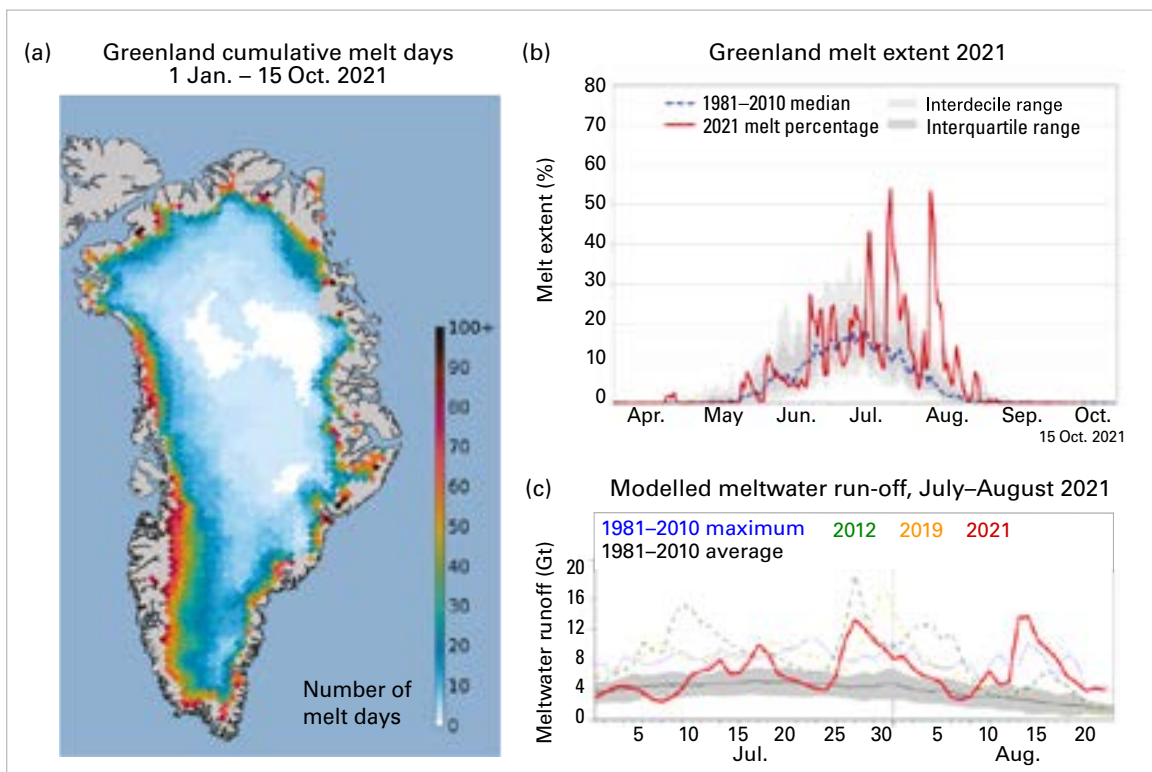
to November 2021, an average rate of mass loss of 276 Gt per year (Figure 15). Greenland’s mass balance in 2021 was close to the 35-year normal, but mass loss was below the average for the period 2002–2020 for which satellite gravity data are available.

For the summer 2021 melt season in Greenland, melt extent was close to the long-term average through the early summer, but temperatures and meltwater run-off were

well above normal in late July and August 2021 (Figure 16).⁵¹ The August event was associated with a warm, humid air mass that moved in from Baffin Bay and covered much of south-western and central Greenland. On 14 August, rain was observed for several hours at Summit Station, the highest point on the Greenland ice sheet (3 216 m), and air temperatures remained above freezing for about nine hours.^{52,53} There is no previous report of rainfall at Summit, and this is the

Figure 16. (a) Cumulative melt days on the Greenland ice sheet, 2021, indicating melt impacts over most of the ice sheet in summer 2021. (b) Melt extent (%) over the ice sheet through the 2021 melt season on Greenland, relative to the median melt extent from 1981 to 2010. (c) Greenland meltwater run-off through July–August 2021 relative to the recent extensive melt seasons of 2012 and 2019, indicating the record amount of late-season ice sheet melting associated with the mid-August rainfall event at Summit.

Source: All images are courtesy of the USA National Snow and Ice Data Center <http://nsidc.org/greenland-today/>, with thanks to Ted Scambos and the Greenland Ice Sheet Today team. Analysis in (a) and (b) is from Thomas Mote, University of Georgia, USA, and meltwater run-off in (c) is estimated from the regional climate model MARv3.12, courtesy of Xavier Fettweis, University of Liège, Belgium.



⁵¹ <http://nsidc.org/greenland-today/2021/08/rain-at-the-summit-of-greenland/>

⁵² Moon, T. A.; Tedesco, M.; Box, J. E. et al. Greenland Ice Sheet. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/546g-ms61>.

⁵³ <http://nsidc.org/greenland-today/2021/08/rain-at-the-summit-of-greenland/>

latest date in the year that above-freezing temperatures have been recorded at this location. Melt events at Summit were also observed in 1995, 2012 and 2019. Ice core records indicate that prior to 1995, the last time melting occurred at Summit was in the late nineteenth century.⁵⁴

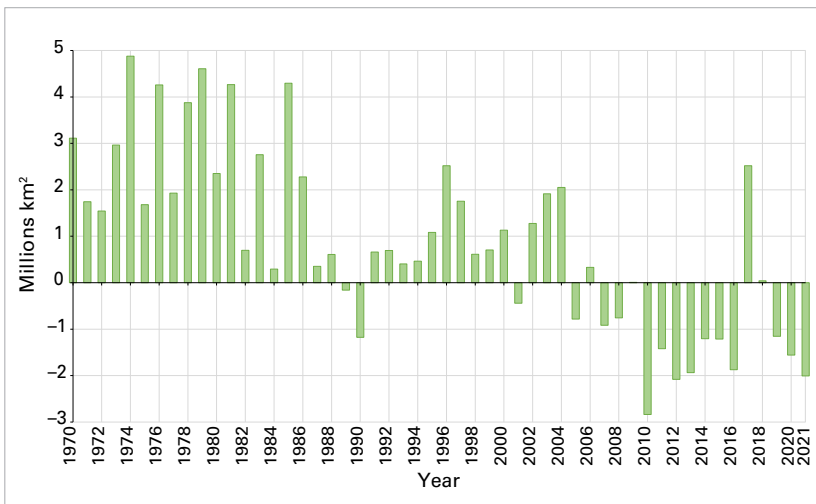
Antarctic ice sheet

The Antarctic ice sheet experiences negligible surface melt compared to Greenland, but some melt typically occurs on the Antarctic Peninsula between November and February, as well as on some of the low-lying ice shelves and in coastal zones. The summer 2020/2021 melt season in Antarctica was moderate and was below the 1990–2020 average.⁵⁵ The northern Filchner Ice Shelf in the Weddell Sea experienced a strong but brief melt event in mid-December 2020. The summer melt season in Antarctica concluded in mid-February 2021. The strongest positive melt anomalies

of the year were over the remnant Larsen B and C ice shelves on the Antarctic Peninsula; most other locations experienced near-normal melt extent relative to the mean 1990–2020 conditions.

Despite near-normal surface melting in Antarctica in summer 2020/2021, GRACE-FO satellite gravity data indicate that the Antarctic ice sheet continued to lose mass in early 2021 (Figure 15), associated with calving and marine ice sheet melting in the Amundsen Sea sector of West Antarctica. Antarctic ice sheet mass loss since 2010 is largely driven by thinning and grounding-line retreat of Thwaites Glacier, triggered by ocean warming in this sector of the ice sheet.⁵⁶ GRACE-FO data⁵⁷ indicate that Antarctica lost a mass of 296 Gt from November 2020 to November 2021, which is roughly double the average rate of ice loss in Antarctica from 2002 to 2021 (Figure 15).

Figure 17. May snow-cover extent (SCE) anomaly in the northern hemisphere (NH) for the period 1970–2021, relative to the 1991–2020 average.
Source: Rutgers Northern Hemisphere Snow Cover Extent product: <https://snowcover.org>.



SNOW

Seasonal snow cover in the northern hemisphere (NH) has been experiencing a long-term decline in the late spring and summer, along with evidence of relative stability or increases in snow extent in the autumn.⁵⁸ Snow-cover extent (SCE) in 2021 was consistent with these long-term trends, with a May NH snow cover anomaly of –2 million km², the third lowest in the SCE record from 1970–2021 (Figure 17), based on analyses of the Rutgers Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE) product.⁵⁹ Reductions in northern hemisphere spring snow extent are consistent across data sets, and in 2021 this was driven by below-normal snow cover in

⁵⁴ Meese, D. A.; Gow, A. J.; Grootes, P. et al. The Accumulation Record from the GISP2 Core as an Indicator of Climate Change Throughout the Holocene. *Science* **1994**, *266* (5191), 1680–1682. <https://doi.org/10.1126/science.266.5191.1680>.

⁵⁵ <http://nsidc.org/greenland-today/2021/04/the-antarctic-2020-to-2021-melt-season-in-review/>

⁵⁶ Velicogna, I.; Mohajerani, Y.; Landerer, G. A. F. et al. Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-On Missions. *Geophysical Research Letters* **2020**, *47* (8), e2020GL087291. <https://doi.org/10.1029/2020GL087291>. See also Rignot, E.; Mouginot, J.; Scheuchl, B. et al. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2019**, *116* (4) 1095–1103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>.

⁵⁷ Wiese, D.N.; Yuan, D.-N.; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

⁵⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

⁵⁹ <https://snowcover.org>



Figure 18. Recent slope instability associated with permafrost thaw, including active layer detachment slides and retrogressive thaw slumps. In the foreground, large amounts of material have pushed into the river to form a debris tongue. Foothills of the Mackenzie Mountains south of Norman Wells, north-western Canada. *Credit:* Government of Northwest Territories, Canada.

Eurasian high latitudes. Eurasian Arctic snow extent in May and June 2021 were the fifth and third lowest on record for the period 1967–2021.⁶⁰

PERMAFROST

Permafrost occurs beneath about one eighth of Earth’s exposed land area. It is ground that remains at or below 0 °C for at least two consecutive years. Permafrost thaw can lead to landscape instability and other impacts, including the emission of greenhouse gases from previously frozen organic material. As permafrost temperature approaches 0 °C, changes in temperature in the ice-rich ground are stalled due to the phase change between ice and water. While temperature increase may level off near 0 °C for several years or decades due to the phase change, the impacts of permafrost warming and thaw on ground stability (including subsidence and mass movements), hydrology, ecosystems and infrastructure are often clearly visible (Figure 18).

Since the 1990s, the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) has compiled data sets

of permafrost temperatures (temperature measured in boreholes) and active layer thickness (the maximum thickness of the seasonally thawed layer above the permafrost). GTN-P products rely mostly on research projects to sustain activities. Long-term data series from national and regional networks operating in mountain and polar areas show a continuation of past warming trends up to 2020, which is the most recent data available.

STRATOSPHERIC OZONE

Following the success of the Montreal Protocol, the use of halons and chlorofluorocarbons (CFCs) has been reported as discontinued, although their levels in the atmosphere continue to be monitored. Because of their long lifetime, these compounds will remain in the atmosphere for many decades. Even if there were no new emissions, there is still more than enough chlorine and bromine present to cause the complete destruction of ozone over Antarctica from August to December. As a result, the formation of the Antarctic ozone hole – an area of low ozone concentration – continues to be an annual

⁶⁰ Mudryk, L.; Chereque, A. E.; Derksen, C. et al. Terrestrial Snow Cover. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/16xy-9h55>.

Figure 19. Left: Ozone hole area (millions of km²). Right: Minimum ozone, where the total ozone column is less than 220 Dobson Units. The year 2021 is shown in red. The most recent years are shown for comparison as indicated by the legend. The smooth, thick grey line is the 1979–2020 average. The blue shaded area represents the 10th to 90th percentiles, and the green shaded area represents the 30th to 70th percentiles for the period 1979–2020. The thin black lines show the maximum and minimum values for each day in the 1979–2020 period. *Source:* The plot was generated at WMO on the basis of data downloaded from the NASA Ozone Watch (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>). The NASA data are based on satellite observations from the OMI and TOMS instruments.

spring event, with the year-to-year variation in its size and depth governed to a large degree by meteorological conditions.

The 2021 Antarctic ozone hole developed relatively early and continued growing, resulting in a large and deep ozone hole. It expanded to 24 million km² on 24 September and remained close to this value until mid-October 2021. The development of the hole, and its extent and severity, were close to that for the 2020 and 2018 seasons. The ozone hole reached its maximum area of 24.8 million km² on 7 October 2021, similar to the areas in 2020 and 2018, and close to the highest values observed in earlier years, such as 28.2 million km² in 2015 and 29.6 million km² in 2006, according to an analysis from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Figure 19, left).

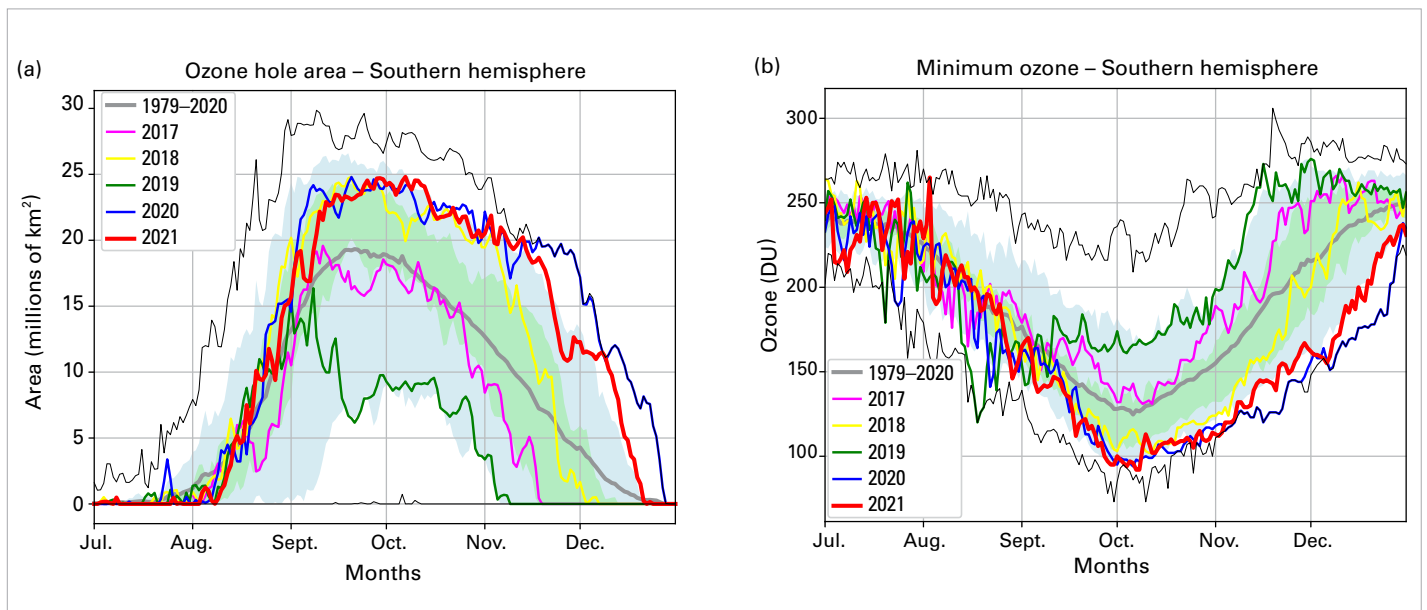
In terms of the total ozone column, NASA reported a minimum ozone of 92 DU (Dobson Units) on 7 October 2021, which was the lowest value for the 2021 season and for the past 17 years (Figure 19, right). After September 2021, the concentration of stratospheric ozone was persistently reduced to near-zero values between 15 and 20 km altitude over Antarctica. Together with the 2020 season, these are some of the lowest ozone values ever measured via sondes at the Antarctic stations, as reported by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

The 2021 hole was larger and deeper than 70% of the ozone holes since 1979, and remained as such until the closing of the hole in the second half of December. It ranked as the thirteenth largest ozone hole by area and the sixth deepest ozone hole in terms of minimum ozone. The unusually deep and large ozone hole in 2021 was driven by a strong and stable polar vortex and colder-than-average conditions in 2021 in the stratosphere.

DRIVERS OF SHORT-TERM VARIABILITY

There are many different natural phenomena, often referred to as climate patterns or climate modes, that affect weather at timescales ranging from days to several months. Surface temperatures change relatively slowly over the ocean, so recurring patterns in sea-surface temperature can be used to understand and, in some cases, predict the more rapidly changing patterns of weather over land on seasonal timescales. Similarly, albeit at a faster rate, known pressure changes in the atmosphere can help explain certain regional weather patterns.

In 2021, the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), the Indian Ocean Dipole (IOD), the Arctic Oscillation (AO) and the Southern Annular Mode (SAM) each contributed to



major weather and climate events in different parts of the world, and are described in further detail below.

EL NIÑO–SOUTHERN OSCILLATION

ENSO is one of the most important drivers of year-to-year variability in weather patterns worldwide. It is linked to hazards such as heavy rains, floods and drought. El Niño, characterized by higher-than-average sea-surface temperatures in the eastern Tropical Pacific and a weakening of the trade winds, typically has a warming influence on global temperatures. La Niña, which is characterized by below-average sea-surface temperatures in the central and eastern Tropical Pacific and a strengthening of the trade winds, has the opposite effect.

La Niña conditions emerged in mid-2020 and peaked in the October–December period at moderate strength, with average sea-surface temperatures 1.3 °C below the 1991–2020 normal in the Niño 3.4 region (5°N–5°S, 120°W–170°W). La Niña weakened through the first half of 2021, reaching an ENSO-neutral state (temperatures within 0.5 °C of normal) in May, according to both oceanic and atmospheric indicators. However, sea-surface temperatures cooled after mid-year, reaching La Niña thresholds once again by the July–September period. By the October–December period, average sea-surface temperatures once again reached moderate strength, at 1.0 °C below normal.

In addition to having a temporary cooling influence on Earth’s global temperature, La Niña is associated with drier-than-normal conditions in East Africa. Kenya, Ethiopia and Somalia experienced consecutive below-average rainfall seasons in late 2020, early 2021 and late 2021, which led to drought in the region. In early 2021, precipitation was higher than normal over the Maritime Continent⁶¹ (the climatologically important region of islands and seas between mainland South-east Asia and Australia and between

the Indian and Pacific Oceans) and lower than normal in Patagonia at the beginning of the year, which are typical patterns associated with La Niña. Additionally, La Niña conditions can contribute to above-average hurricane activity in the North Atlantic, which experienced 21 named tropical cyclones during its 2021 hurricane season (the 1981–2010 average for the entire season is 14). La Niña is also associated with warmer and drier areas across the southern tier of the United States of America. In December, most states in this region reported record or near-record high temperatures, and several states were also drier than average.

INDIAN OCEAN DIPOLE

The positive phase of the IOD is characterized by below-average sea-surface temperatures in the Eastern Indian Ocean and above-average sea-surface temperatures in the west. The negative phase has the opposite pattern. The resulting change in the gradient of sea-surface temperature across the ocean basin affects the weather of the surrounding continents, primarily in the southern hemisphere. Positive IOD events are often associated with El Niño and negative events with La Niña.⁶²

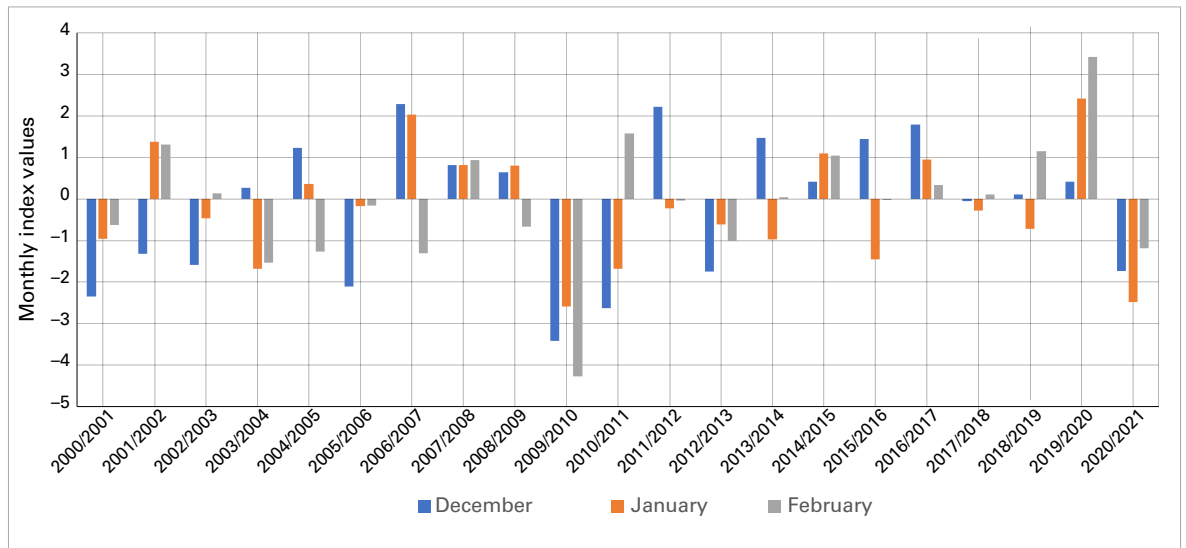
A negative IOD developed during July 2021 and returned to neutral, although on the negative side, by the end of the year. This marked the first negative IOD since 2016. In combination with La Niña, this phase contributed to wet conditions in much of Australia in the late austral winter and spring. South-west Western Australia reported its highest July rainfall totals since 1996, as did many locations in South Australia. Australia as a whole observed its tenth wettest spring in its 122-year record, with the state of New South Wales observing its fourth wettest. November was the wettest November since records began for both New South Wales and Australia as a whole.⁶³ Conversely, the negative IOD, again in combination with La Niña, likely contributed to the extreme dry conditions in Eastern Africa.

⁶¹ Ramage, C. S. Role of a Tropical “Maritime Continent” in the Atmospheric Circulation. *Monthly Weather Review* **1968**, 96(6), 365–370. https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/96/6/1520-0493_1968_096_0365_roatmc_2_0_co_2.xml.

⁶² <http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/In-2010-12/IOD-what.shtml>

⁶³ <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs75.pdf>

Figure 20. Arctic Oscillation monthly index values for northern hemisphere winter months 2000/2021. December is in blue, January in orange and February in grey. *Source:* National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center.



ARCTIC OSCILLATION

The AO is a large-scale atmospheric pattern that influences weather throughout the northern hemisphere.⁶⁴ The positive phase is characterized by lower-than-average air pressure over the Arctic and higher-than-average pressure over the Northern Pacific and Atlantic Oceans. The jet stream runs parallel to the lines of latitude and farther north than average, locking up cold Arctic air, and storms can be shifted northward of their usual paths. The mid-latitudes of North America, Europe, Siberia and East Asia generally see fewer cold air outbreaks than usual during the positive phase of the AO. A negative AO has the opposite effect, associated with a more meandering jet stream and cold air spilling south into the mid-latitudes where the jet stream dips southward.

The AO was negative during the northern hemisphere 2020/2021 winter and, seasonally, was the most negative on record since winter 2009/2010 (Figure 20). The jet stream swept down over North America, contributing to the coldest February for the continent since 1994. However, the same wavy jet stream also contributed to extreme warmth in parts of Northern and Eastern Asia in February 2021 as it surged northward over the area, with

regions in Mongolia, China, Japan and the Republic of Korea reporting record high temperatures for this time of year. The contrast between the positive AO (winter 2019/2020) and the negative AO (winter 2020/2021) could explain some of the differences between temperature patterns in the first quarters of 2020 and 2021. The negative winter phase of the Arctic Oscillation has also been linked to more moderate Arctic sea-ice loss the following summer⁶⁵ (see [Arctic sea ice](#)).

SOUTHERN ANNULAR MODE

On the opposite side of the world, the SAM (also referred to as the Antarctic Oscillation, AAO) is a large-scale atmospheric pattern that influences weather in the southern hemisphere. It is measured by the north–south movement of the westerly wind belt that circles Antarctica, dominating the middle to higher latitudes of the southern hemisphere. The positive phase is characterized by the belt of strong westerly winds contracting towards Antarctica and is linked to the La Niña phase of ENSO. During a positive SAM, warm and moist westerly flow over the northern Peninsula leads to foehn warming on the eastern side and anomalous warmth. The negative phase, in contrast, is characterized

⁶⁴ Thompson, D. W. J.; Wallace, J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters* **1998**, *25* (9), 1297–1300.

⁶⁵ Rigor, I. G.; Wallace, J. M.; Colony, R. L. Response of Sea Ice to the Arctic Oscillation. *Journal of Climate* **2002**, *15* (18), 2648–2663. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2).

by an expansion of the belt of strong westerly winds towards the equator.⁶⁶ Notably, the SAM can have large impacts on Antarctic surface temperatures, ocean circulation and rainfall patterns in parts of Australia.

The SAM was primarily positive or neutral throughout 2021, and was strongly positive both at the beginning of the year and near the end of the year.⁶⁷ This positive pattern likely contributed to the record cold austral winter

and April–September cold season at the South Pole, as it created anomalous low wind speed and wind directions predominantly from the northeast at the pole and prevented warm air masses from reaching the area. Conversely, Esperanza Station, on the north-east Antarctic Peninsula, experienced its warmest year on record, with an average temperature of $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. On 18 December, the temperature reached $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, an all-time December high for the station.

⁶⁶ <http://www.bom.gov.au/climate/sam/>

⁶⁷ <http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html>

High-impact events in 2021

Although understanding broad-scale changes in the climate is important, the acute impacts of weather and climate are most often felt during extreme meteorological events such as heavy rain and snow, droughts, heatwaves, cold waves and storms, including tropical storms and cyclones. These can lead to or exacerbate other high-impact events such as flooding, landslides, wildfires and avalanches. This section is based largely on input from WMO Members. The wider socioeconomic risks and impacts associated with these events are described in [Risks and impacts](#).

HEATWAVES AND WILDFIRES

Exceptional heatwaves affected Western North America on several occasions during June and July. By some measures, the most extreme was in late June in the north-western United States and western Canada. Lytton, in south-central British Columbia, reached 49.6 °C on 29 June, breaking the previous Canadian national record by 4.6 °C, with temperatures reaching the mid-40s as far west as the eastern suburbs of Vancouver and the interior of Vancouver Island. It was also more than 5 °C higher than the previous highest known temperature north of 50°N. Large numbers of heat-related deaths occurred, with 569 reported in British Columbia alone between 20 June and 29 July,⁶⁸ and 185 in Alberta,⁶⁹ while in the United States over a similar period, 154 heat-related deaths were reported in Washington⁷⁰ and at least 83 in Oregon.⁷¹ Many long-term stations broke records by 4 °C to 6 °C, including Portland, Oregon (46.7 °C). There were also multiple heatwaves in the south-western United States. Death Valley, California reached 54.4 °C on 9 July, equalling a similar 2020 value as the highest recorded in the world since at least the 1930s. It went on to be the hottest summer on record averaged over the continental United States.

There were numerous major wildfires during and after the heatwaves (including one which largely destroyed the town of Lytton the day after its record temperature). The Dixie fire in northern California, which started on 13 July, burned about 390 000 hectares before being fully contained in October, making it the largest single fire on record in California. A rare winter wildfire caused major property losses east of Boulder, Colorado on 30 December, with more than 1 000 homes and other buildings destroyed or damaged. The overall area burned during the season in the United States was slightly below average,⁷² but in Canada it was well above average, with Ontario having its largest seasonal area burned on record and British Columbia its third largest. Prolonged smoke pollution affected many parts of North America during the summer, with Calgary reporting a record 512 hours of smoke or haze, compared with the long-term average of 12.

Extreme heat affected the broader Mediterranean region on several occasions during the second half of the northern hemisphere summer. The most exceptional heat was in the second week of August. On 11 August, an agrometeorological station near Syracuse in Sicily, Italy, reached 48.8 °C, a provisional European record, while Kairouan (Tunisia) reached a record 50.3 °C. Montoro (47.4 °C) set a national record for Spain on 14 August, while on the same day Madrid (Barajas Airport) had its hottest day on record with 42.7 °C. Earlier, on 20 July, Cizre (49.1 °C) set a Turkish national record and Tbilisi (Georgia) had its hottest day on record (40.6 °C). Major wildfires occurred across many parts of the region, with Algeria, southern Turkey and Greece especially badly affected. Over 40 deaths⁷³ occurred in the Algerian fires. France, Italy, North Macedonia, Lebanon, Israel, Libya, Tunisia and Morocco also experienced significant wildfires during the period.

⁶⁸ <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/life-events/death/coroners-service/news-and-updates/heat-related>

⁶⁹ <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/top-ten-weather-stories/2021.html>

⁷⁰ <https://www.doh.wa.gov/Emergencies/BePreparedBeSafe/SevereWeatherandNaturalDisasters/HotWeatherSafety/HeatWave2021#heading88455>

⁷¹ Oregon Medical Examiner's Office, quoted in media reports, <https://flashalert.net/id/OSP0re/146352>

⁷² <https://www.nifc.gov/>

⁷³ <https://www.emdat.be/>

June was exceptionally warm in many parts of Eastern and Central Europe. National June records were set for Estonia (34.6 °C) and Belarus (37.1 °C), while locations which had their hottest June day on record included St. Petersburg (35.9 °C) and Moscow (34.8 °C), both on 23 June, Yerevan (Armenia, 41.1 °C) on the 24th, and Baku (Azerbaijan, 40.5 °C) on the 26th. Tampere in Finland reported its highest temperature on record (33.2 °C) on 22 June. Latvia had its hottest June and summer on record. Further afield, Libya also saw a prolonged heatwave in late June. Later in the summer, abnormal warmth also reached North-west Europe; 31.3 °C at Castlederg on 21 July was a record for Northern Ireland. Two tropical nights were observed in Ireland in July, with daily minimum temperatures exceeding 20 °C in County Kerry.

For the third successive year, there were major wildfires during the summer in Siberia, particularly in the Sakha Republic around Yakutsk. According to a report by the Federal Forestry Agency of Russia, the number of fires in Yakutia by the end of the summer was 2 295, with an area of about 8.9 million hectares burned since the beginning of the forest fire season.

Fire activity in the Amazon region during the August–September peak season was less than in 2019 or 2020,⁷⁴ but there was extensive fire activity in other parts of Brazil, including the Pantanal.

COLD SPELLS AND SNOW

Abnormally cold conditions affected many parts of the central United States and northern Mexico in mid-February. The most severe impacts were in Texas, which generally experienced its lowest temperatures since at least 1989, with temperatures in some areas staying below freezing continuously for 6 to 9 days. On 16 February, Oklahoma City reached –25.6 °C and Dallas –18.9 °C, their lowest temperatures since 1899 and

1949 respectively. Electricity transmission was severely disrupted, with power outages affecting nearly 10 million people at the event's peak. Frozen pipes were another major cause of damage. A total of 226 deaths were reported in the United States along with an estimated US\$ 24 billion in economic losses, making it the costliest winter storm on record for the United States.⁷⁵

The winter of 2020/2021 was a cold winter in many parts of Northern Asia. The Russian Federation had its coldest winter since 2009/2010. Below-average temperatures affected much of Japan in late December and early January, with heavy snowfalls on a number of occasions. A number of locations on the Sea of Japan coast of Honshu had their heaviest 72-hour snowfall on record in early January. Much of China was also unusually cold during this period, with Beijing reaching –19.6 °C on 7 January, its lowest temperature since 1966.

A severe snowstorm hit many parts of Spain from 7 to 10 January, followed by a week of freezing air temperatures. A total of 53 cm of snow fell at the central city location of Retiro (Madrid), and heavy falls were also reported in many other parts of Spain.⁷⁶ Some locations, including Toledo (–13.4 °C) and Teruel (–21.0 °C), had their lowest temperatures on record on 12 January in the wake of the storm. There were major disruptions to land and air transport. Later in the winter, in the second week of February, the Netherlands experienced its most significant snowstorm since 2010, with heavy snow also falling in Germany, Poland and the United Kingdom; in the wake of the storm, Braemar recorded –23.0 °C on 12 February, the lowest temperature in the United Kingdom since 1995. In South-eastern Europe, Athens had its heaviest snow since 2009 on 15 February. Libya experienced unusual snowfalls between 15 and 21 February and again, on high ground, in late December.

An abnormal spring cold outbreak affected many parts of Europe in early April. Record

⁷⁴ https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/

⁷⁵ <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/2021>

⁷⁶ http://www.aemet.es/en/conocermas/borrascas/2020-2021/estudios_e_impactos/filomena

low April temperatures in France included -7.4°C at Saint-Etienne on the 8th and -6.9°C at Beauvais on the 6th, while Belgrade (Serbia) had its heaviest April snowfall on record on the 7th. It was the coldest April in Poland in the twenty-first century. At high elevations, national records for April were set for Switzerland (-26.3°C at Jungfrauoch) and Slovenia (-20.6°C at Nova vas na Blokah). This followed a very warm end to March with France having its warmest March day on record on the 31st. Frost damage to agriculture was widespread and severe, with losses to vineyards and other crops in France alone exceeding US\$ 4.6 billion. The United Kingdom went on to have its lowest monthly mean temperature for April since 1922.

PRECIPITATION

Compared to temperature, precipitation is characterized by higher spatial and temporal variability. In 2021, large regions with above-normal precipitation totals, relative to the chosen climatology period (1951–2000), were Eastern Europe, South-east Asia, the Maritime Continent, areas of Northern South America and parts of South-eastern North America (Figure 21). Large regions with a rainfall deficit included South-west Asia and

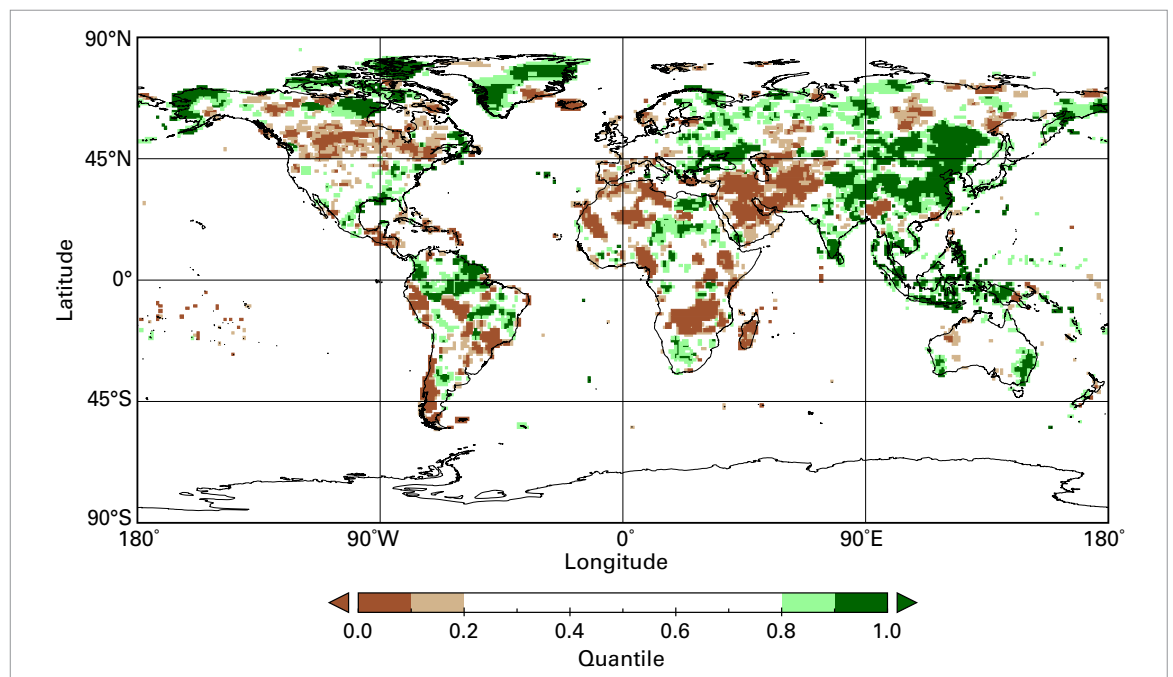
the Middle East, parts of Southern Africa, parts of Southern South America and areas in Central North America.

The onset of the West African Monsoon was delayed. Later in the season, rainfall totals were higher than normal, especially in the western monsoon region. In total, the seasonal rainfall was close to normal. In Southern Africa, in an area centred on Zambia, rainfall amounts during the wet season until May were below the long-term mean. It was at least the second year in a row with below-normal rainfall for Madagascar; rainfall totals have been below average in most years since 2011. In addition, both the wet seasons (April to May and October to November) were drier than usual in the Greater Horn of Africa region.

Above average rainfall totals were observed in Alaska and the north of Canada, and in the south-eastern United States and parts of the Caribbean. Between these two wetter-than-average bands was a swath of unusually dry conditions extending across the width of the continent.

Unusually high precipitation amounts, relative to the reference period, were recorded in south-western and south-eastern Australia. On the other hand, abnormally low precipitation amounts were received on the North Island of New Zealand.

Figure 21. Total precipitation in 2021, expressed as a percentile of the 1951–2010 reference period, for areas in the driest 20% (brown) and wettest 20% (green) of years during the reference period, with darker shades of brown and green indicating the driest and wettest 10%, respectively.
Source: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), Deutscher Wetterdienst, Germany.



Unusually low precipitation amounts fell around the Mediterranean Sea, while unusually high totals were detected around the Black Sea and in parts of Eastern Europe.

FLOOD

Extreme rainfall, which was enhanced by the moisture influx ahead of Typhoon *In-fa*, hit Henan province in central China from 17 to 21 July. The most severely affected area was around the city of Zhengzhou (the capital of Henan Province), which on 20 July received 201.9 mm of rainfall in one hour (a Chinese national record) and 382 mm in 6 hours. For the event as a whole, the area received 720 mm, more than its annual average. The city experienced extreme flash flooding, with many buildings, roads and subways inundated. The flooding was associated with 380 deaths or missing persons, and economic losses of US\$ 17.7 billion were reported.⁷⁷ Further late-season flooding occurred in early October, focused on Shanxi and Hebei provinces.

Western Europe experienced some of its most severe flooding on record in mid-July. The worst-affected area was western Germany and eastern Belgium, where 100 to 150 mm of rain fell over a wide area on 14–15 July onto ground which was already unusually wet after high recent rainfall. Hagen (Germany) reported 241 mm of rainfall in 22 hours. Numerous rivers experienced extreme flooding, with several towns inundated, and there were also several landslides. France, the Netherlands, Luxembourg and Switzerland also experienced significant flooding. The number of deaths reported in Germany was 183, and in Belgium it was 36, with economic losses in Germany exceeding US\$ 20 billion.⁷⁸

Persistent heavy rainfall in mid-March resulted in major flooding in eastern New South Wales

in Australia.⁷⁹ The week from 18 to 24 March was the wettest on record averaged over coastal New South Wales. The most severe flooding was along the Hastings, Karuah and Manning Rivers north of Sydney, but there was also significant flooding in other areas, including parts of western Sydney. There was also flooding on many inland rivers, which led to substantial recovery in water storages severely depleted by the 2017–2019 drought. At least US\$ 2.1 billion in economic losses were reported.

Two flash flood events associated with localized heavy rainfall occurred in Afghanistan during 2021, in early May around Herat in the west, and on 28–29 July centred on Nuristan in the east. There was significant loss of life in both events, with 61 deaths reported in the May event and 113 in the July event.⁸⁰

Flash flooding occurred on several occasions around the Mediterranean and Black Sea coasts. The most impactful event was on the Black Sea coast of Turkey on 10 August, where several towns experienced severe damage and 77 deaths were reported. Rainfall of 399.9 mm was recorded at Bozkurt in 24 hours. This event was associated with a “Medicane” – a storm forming outside the tropics that nevertheless has characteristics of a tropical storm – in the Black Sea. Extreme rainfall and flooding were also reported on the Black Sea coast of the Russian Federation from 12 to 14 August.

On 4 October, exceptional rainfall fell in coastal regions of Liguria (north-west Italy), including 496.0 mm in 6 hours at Montenotte Inferiore and 740.6 mm in 12 hours at Rossiglione.

Persistent above-average rainfall in the first half of the year in parts of Northern South America, particularly the northern Amazon basin, led to significant and long-lived flooding in the region. The Rio Negro at Manaus (Brazil) reached its highest level on record, peaking at 30.02 m on 20 June.⁸¹ The most

⁷⁷ RM 114.3 billion, from China’s national contribution

⁷⁸ National contribution, Germany

⁷⁹ <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs74.pdf?20210621>

⁸⁰ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000050-afg>

⁸¹ http://www.cprm.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20211022_11-20211025%20-%20114229.pdf

widespread flooding was reported in northern Brazil, but Guyana, Bolivarian Republic of Venezuela and Colombia were also affected.

The progress and withdrawal of the Indian Monsoon was delayed, but overall Indian monsoon rainfall was close to average, with above-average rainfalls in the west offset by below-average values in the north-east. During the course of the season, 529 deaths in India and 198 in Pakistan (as of 30 September) were attributed to flooding, with further deaths in Bangladesh and Nepal.⁸² There was further flooding in eastern India and Nepal during the north-east monsoon season in October and November. In Eastern Asia, eastern China (except for Henan) was generally less wet during the monsoon season than in 2020, but August was extremely wet in Japan. Western Japan had its wettest August on record,⁸³ with some locations receiving more than 1400 mm of rain between 11 and 26 August. A tropical depression made landfall in Malaysia on 16 December, leading to severe flooding in Selangor and Kuala Lumpur, with at least 52 deaths reported. At Kuala Lumpur International Airport, 230 mm of rain was reported in 12 hours on 17–18 December.⁸⁴

The rainy season in the African Sahel was generally close to the average (1951–2000), and less wet than in some recent years, although there was still some significant flooding reported, especially in Niger, Sudan and South Sudan as well as Mali. Elsewhere in Africa, Lake Tanganyika rose to more than 3 m above its normal level in May,⁸⁵ displacing lakeshore residents in Burundi, while Lake Victoria rose to its highest level since satellite data began in 1992, surpassing its peak from the previous year. High flows in the Nile downstream of Lake Victoria, along with substantial standing water still remaining from floods in 2020, contributed to continued flooding in parts of South Sudan

and Sudan despite near-normal rainfall in 2021. In Southern Africa, much of which had been experiencing long-term drought, rainfall during the 2020/2021 rainy season was above average in some regions, including northern South Africa and Zimbabwe, with some flooding reported, but was near or below average further north.

Western Canada was affected by severe flooding in November. At numerous locations in southern British Columbia 200 to 300 mm of rain fell in 60 hours, causing floods and landslides (in some cases exacerbated by runoff from fire-affected areas). Transport was severely disrupted, with most major routes connecting Vancouver with the rest of Canada closed for several weeks, and several communities were partly or wholly inundated. Six deaths were reported, and economic losses exceeded Can\$ 2 billion. Flooding also affected adjacent areas of the north-western United States. Seattle and Vancouver both had their wettest autumns on record.

DROUGHT

Significant drought affected much of subtropical South America for the second successive year. Rainfall was well below average over much of central and southern Brazil,⁸⁶ Paraguay, Uruguay and northern Argentina. The drought led to significant agricultural losses, exacerbated by a cold outbreak at the end of July, in which maximum temperatures were below 10 °C for five consecutive days over higher parts of southern Brazil and which contributed to damage in many of Brazil's coffee-growing regions. Low river levels also reduced hydroelectricity production⁸⁷ and disrupted river transport. The Brazilian government declared a situation of critical scarcity of water resources in the Paraná

⁸² National contributions of India and Pakistan; EM-DAT has 120 deaths in Nepal over two incidents and 21 in Bangladesh from one

⁸³ https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/news/press_20210924.pdf

⁸⁴ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000209-mys>

⁸⁵ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000039-bdi>

⁸⁶ <https://clima.inmet.gov.br/prec>

⁸⁷ <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210707-escassez-hidrica-2021.aspx>

hydrographic region, with numerous water stores at or near their lowest levels in the last 20 years.⁸⁸ The 24-month Standardized Precipitation Index (SPI) over the region reached its lowest level since the 1960s. The Paraguay River at Asuncion fell to a record low 0.75 m below the reference level on 6 October, 0.21 m below the previous record set in 2020. In Chile, where long-term drought has persisted for the last decade, 2021 was another dry year, with most locations having rainfall at least 30% below average. A number of locations south of Santiago had their driest year on record in 2021 with totals 40% to 50% below normal, including Concepción (559.2 mm), Valdivia (949.0 mm) and Puerto Montt (921.7 mm).

Widespread drought in Western North America, which had become established during 2020, spread and intensified in 2021. By September, extreme to exceptional drought covered most of the United States over and west of the Rocky Mountains, despite some slight easing from July onwards in parts of the inland south-west, due to an active summer monsoon. Extreme to exceptional drought also extended eastwards on both sides of the United States–Canada border, affecting northern border states as far east as Minnesota and the Prairie Provinces of Canada. The 20 months from January 2020 to August 2021 were the driest on record for the south-western United States,⁸⁹ with precipitation more than 10% below the previous record. Forecast wheat and canola crop production for Canada in 2021 was 35% to 40% below 2020 levels,⁹⁰ while in the United States, the level of Lake Mead on the Colorado River fell in July to 47 m below full supply level, the lowest level on record since the reservoir was fully commissioned. The drought situation in California was eased by heavy rain in late October and December – Sacramento had its wettest day on record with 138 mm on 24 October, only days after ending a record 211-day period with no measurable

precipitation – but drought continued away from the west coast and extended farther east through the south-central United States as the year ended.

Significant drought affected large areas of South-west Asia during 2021. Well-below-average precipitation fell during the 2020/2021 cool season in regions including most of the Islamic Republic of Iran, Afghanistan, Pakistan, south-east Turkey, and Turkmenistan. Pakistan had its third-driest February and fifth-driest January–March on record. Mountain snowpack was also well below average, with snow cover extent in Islamic Republic of Iran about half the long-term average for most of January and February, leading to reduced streamflow in rivers depending on snowmelt, and reduced water availability for irrigation.

Drought developed during the course of the year in the Greater Horn of Africa region, particularly affecting Somalia, Kenya and parts of Ethiopia, after three successive below-average rainy seasons. The October–December rainy season was especially poor, despite some rains in Kenya late in the season.

A severe drought, which has persisted for at least two years, continues to affect southern Madagascar.⁹¹ Rainfall for the 12 months from July 2020 to June 2021 was around 50% below normal over the region. There were significant food security issues in the area, with 1.14 million people classified by the World Food Programme as needing urgent assistance as of August 2021.⁹²

TROPICAL CYCLONES

Tropical cyclone activity around the globe in 2021 was close to average (1981–2010). For the second successive year, the North Atlantic

⁸⁸ <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-declara-situacao-de-escassez-quantitativa-dos-recursos-hidricos-da-regiao-hidrografica-do-parana>

⁸⁹ <https://www.drought.gov/news/new-noaa-report-exceptional-southwest-drought-exacerbated-human-caused-warming>

⁹⁰ <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/210914/dq210914b-eng.htm>

⁹¹ <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/cb7310en.pdf>

⁹² <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WFP%20Madagascar%20Country%20Brief%20-%20August%202021.pdf>

had a very active season, with 21 named storms, well above the 1981–2010 average of 14. It was also an active season in the North Indian Ocean, but activity in the western North Pacific and eastern North Pacific was near to or below average. The 2020/2021 southern hemisphere season was also slightly below average in both the Pacific and Indian Oceans.

The most significant hurricane of the North Atlantic season was *Ida*. *Ida* made landfall as a category 4 system in Louisiana (United States) on 29 August with sustained one-minute winds of 240 km per hour, equalling the strongest landfall on record for the state, with major wind damage and storm surge inundation. The system then continued on a north-east track over land with significant flooding, especially in the New York City area. New York, which had already experienced flooding from Hurricane *Henri* two weeks earlier, had a record hourly rainfall of 80 mm, with 24-hour totals exceeding 200 mm in parts of the city. Before it developed into a tropical cyclone, *Ida*'s precursor system also caused significant flooding in Venezuela. In total, 72 deaths were directly attributed to *Ida* and 43 deaths were indirectly attributed to it in the United States and Venezuela, with economic losses in the United States estimated at US\$ 75 billion.⁹³ Another significant landfall during the season was *Grace*, which hit Veracruz (Mexico) as a category 3 hurricane, having earlier resulted in impacts, mostly from flooding, in Haiti (where it hindered post-earthquake recovery), the Dominican Republic, Jamaica, and Trinidad and Tobago.

In the southern hemisphere, 2021's most significant cyclone⁹⁴ was *Seroja* in April. *Seroja* formed south of Indonesia and tracked south-east towards Western Australia. It made landfall near Kalbarri on 11 April as an (Australian) category 3 cyclone, the strongest landfall so far south in Western Australia since 1956. *Seroja*'s most severe impacts were

from flooding and associated landslides from its precursor system in Timor-Leste, and the Indonesian region of East Nusa Tenggara. Kupang (Timor) received 700.4 mm of rainfall in the four days from 2 to 5 April. A total of 226 deaths were associated with *Seroja*, 181 in Indonesia, 44 in Timor-Leste and one in Australia.⁹⁵ In January, *Eloise* contributed to flooding in Southern Africa, with damage and casualties reported in Mozambique, South Africa, Zimbabwe, Eswatini and Madagascar, while in the South Pacific, *Ana* and *Niran* caused flooding and power outages in Fiji and New Caledonia, respectively.

The most severe cyclone of the North Indian Ocean season was *Tauktae*, which tracked north off the west coast of India, with a peak three-minute sustained wind speed⁹⁶ of 50–53 m per second, before making landfall in Gujarat on 17 May at slightly below peak intensity, equalling the strongest known landfall in Gujarat. At least 144 deaths were reported in India and 4 in Pakistan.⁹⁷ Later in the season, Cyclone *Gulab* crossed the eastern coast of India from the Bay of Bengal in late September; the remnant system crossed India before emerging and re-intensifying in the Arabian Sea, where it was renamed *Shaheen*. *Shaheen* made landfall on 3 October on the northern coast of Oman north-west of Muscat, the first cyclone since 1890 to make landfall in this area. Al Suwaiq recorded 294 mm rain in 24 hours, about three times the region's annual average. A total of 39 deaths were reported across India, Pakistan, Oman and the Islamic Republic of Iran, mostly from flooding.

The most significant tropical cyclone of the season in the western North Pacific was Typhoon *Rai* (*Odetta*), which crossed the central Philippines on 16 December, making landfall at near peak intensity, with a minimum central pressure of 915 hPa, after rapidly intensifying prior to landfall. It reintensified on 18 December after entering the South

⁹³ <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events/US/2021>

⁹⁴ Tropical Cyclone *Yasa* (December 2020) forms part of 2020/2021 seasonal statistics but was reported on in the 2020 State of the Climate.

⁹⁵ <https://reliefweb.int/disaster/tc-2021-000033-idn>

⁹⁶ https://rsmcnewdelhi.imd.gov.in/uploads/report/26/26_e0cc1a_Preliminary%20Report%20on%20ESCS%20TAUKTAE-19july.pdf

⁹⁷ From national contributions

China Sea, before weakening and dissipating without making further landfall. Severe damage occurred across the Philippines, with at least 406 deaths reported, while flooding also occurred in Viet Nam. There were several other significant landfalls, most notably from Typhoon *Chanthu* on the Batanes Islands (the Philippines). *Chanthu* and Typhoon *In-fa*, in July, also both contributed to flooding and disruptions to shipping around Shanghai, while *Dianmu* contributed to flooding in Thailand in September after making landfall in Viet Nam.

SEVERE STORMS

There were multiple severe thunderstorm outbreaks in Western and Central Europe in the second half of June and in July. An F4 tornado⁹⁸ struck several villages in southern Moravia on 24 June, with major damage and six deaths reported. This was the strongest tornado on record in the Czech Republic. Tornadoes were also reported during the month in Belgium, France and Poland. Large hail (6–8 cm in diameter) was reported in multiple countries, including the Czech Republic, Slovakia, Switzerland and Germany. In the Czech Republic alone, losses were around US\$ 700 million.

In the United States, 1 376 tornadoes were provisionally reported during 2021, above the 1991–2010 average. A significant outbreak hit the south-east on 25 March, with the most severe impacts in Alabama and western Georgia.

Six deaths and US\$ 1.8 billion in economic losses were reported. During December 2021, there were 193 confirmed tornado reports, around eight times the 1991–2010 December average of 24. This was double the previous record of 97 from 2002. On 10 December there was an historic outbreak across several south-eastern and central states in which 93 people died and economic losses of US\$ 3.9 billion were reported. This was the deadliest December tornado outbreak in the United States, surpassing the Vicksburg, Mississippi tornado of 5 December 1953, which led to 38 deaths. Hailstorms in Texas and Oklahoma on 27–28 April resulted in US\$ 3.3 billion in losses.

ATTRIBUTION

Attribution of individual extreme events can often take several months because of the need to complete peer review. But it is becoming increasingly possible to carry out near-real-time attribution assessments that use peer-reviewed methods to reach conclusions within just a few days of a weather record being broken. Such “rapid attribution” studies have been carried out for the heatwave in Western North America in June and July,^{99,100,101} the floods in Western Europe in July¹⁰² and the British Columbia floods in November.¹⁰³ Studies of the Western North America heatwave found that while such a heatwave is rare in today’s climate, it would have been virtually impossible without climate change.

⁹⁸ On both the Fujita scale and the Enhanced Fujita scale, a tornado that causes devastating damage is classified as category 4 tornado (F4 and EF4 respectively). The scales differ in the wind speeds thought to be associated with “devastating damage”, with lower wind speeds assumed in the enhanced system for the same level of damage.

⁹⁹ <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>

¹⁰⁰ Philip, S. Y.; Kew, S. F.; van Oldenborgh, G. J. et al. Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. *Earth System Dynamics Discussions*, In review, 1–34. Preprint: <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.

¹⁰¹ Christidis N., 2021. *Using CMIP6 Multi-model Ensembles for Near Real-time Attribution of Extreme Events*; Hadley Centre Technical Notes 107. United Kingdom Met Office Hadley Centre: Exeter, 2021. https://digital.nmla.metoffice.gov.uk/10_e2e76d02-d72e-49d6-8419-728fb313d075/; <https://blog.metoffice.gov.uk/2021/06/29/heatwave-record-for-pacific-north-west/>

¹⁰² <https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/>

¹⁰³ Gillett, N.; Cannon, A.; Malinina, E. et al. *Human Influence on the 2021 British Columbia Floods*; SSRN Scholarly Paper ID 4025205; Social Science Research Network: Rochester, 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4025205>.

For the Western Europe flooding, the rapid attribution study found that the detection of trends in extreme precipitation at the scale of the event in question was challenging, and that saturated soils and the local hydrology were also factors in the event. However, significant trends in extreme precipitation were found across a wider area of Western Europe, and the study concluded that over this broader region, human-induced climate change had increased the likelihood of an extreme precipitation event comparable to that which occurred.

More generally, events such as these fit into a broader pattern of change. The IPCC assessed¹⁰⁴ that hot extremes in the regions of Western North America and North-western North America have increased, and that there is at least medium confidence in a human contribution to this increase. Similarly, the IPCC assessed that heavy precipitation has increased in the region of Western and Central Europe affected by flooding, but that there is currently low confidence in the attribution of this change to human influence.

¹⁰⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Summary for Policymakers. In: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.

Risks and impacts

The risk of climate-related impacts depends on complex interactions between climate-related hazards and the vulnerability, exposure and adaptive capacity of human and natural systems. Climate-related events pose humanitarian risks to society through impacts on health, food and water security as well as human security, human mobility, livelihoods, economies, infrastructure and biodiversity. Climate and extreme weather events also affect the use and distribution of natural resources across regions and within countries, and have large negative impacts on the environment. These negative environmental effects include impacts on the land such as droughts, wildfires in forest and peatland areas, land degradation, sand and dust storms, desertification, flooding and coastal erosion. At current levels of global greenhouse gas emissions, the world remains on course to exceed the agreed temperature thresholds of either 1.5 °C or 2 °C above pre-industrial levels, which would increase the risks of pervasive climate change impacts beyond what is already being seen.

FOOD SECURITY

GLOBAL FOOD SECURITY OUTLOOK IN 2021

The compounded effects of conflict, extreme weather events and economic shocks, further exacerbated by the COVID-19 pandemic, have led to a rise in hunger, undermining decades of progress towards improving food security (Figure 22). Worsening humanitarian crises in 2021 have also caused the number of countries at risk of famine to grow. Of the total number of undernourished people in 2020, more than half live in Asia (418 million) and a third in Africa (282 million). Following a peak in undernourishment in 2020 (768 million people), projections indicated a decline in global hunger to around 710 million in 2021 (9% of the world population).¹⁰⁵ However, as of October 2021, the numbers in many countries were already higher than in 2020. This striking increase was mostly felt among groups already suffering from food crises

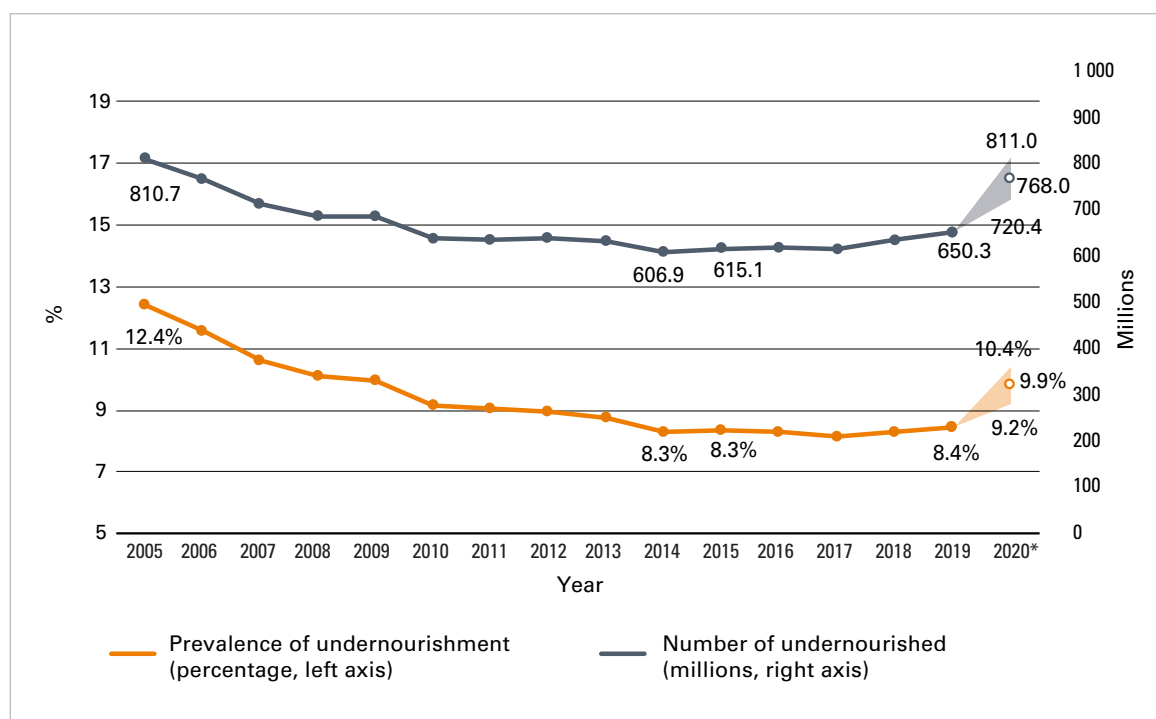


Figure 22. The number of undernourished people in the world significantly increased during the COVID-19 pandemic, from 650 million people in 2019 to 768 million people in 2020. Dotted lines and empty circles illustrate projected values in the figure. Source: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

¹⁰⁵ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All*, https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000130141/download/?_ga=2.47516911.931354890.1634299853-763856357.1633873374.

or worse (IPC/CH Phase 3 or above¹⁰⁶); the number of people in these groups rose from 135 million in 2020 to 161 million by September 2021, a 19% increase.¹⁰⁷ Another consequence of these shocks was growth in the number of people facing starvation and a total collapse of livelihoods (IPC/CH Phase 5); a total of 584 000 people were in this group, mostly in Ethiopia, South Sudan, Yemen and Madagascar. The first quarter of 2021 also saw the highest global consumer food prices in the last six years, concentrated in Latin America and the Caribbean.¹⁰⁸ In West Africa, prices of coarse grains increased, driving food prices to record and near-record highs in several countries. The price increases were exacerbated by civil insecurity and torrential rains. In North Africa, food inflation rates remained at modest levels in 2021, buffered by subsidies on many basic commodities that prevented price increases.

IMPACTS OF HYDRO-METEOROLOGICAL HAZARDS ON FOOD PRODUCTION

The 2020/2021 La Niña altered rainfall seasons, disrupting livelihoods and agricultural campaigns across the world. Associated extreme weather, water and climate events during the 2021 rainfall season compounded shocks from the previous year or years, making it increasingly difficult to quantify impacts resulting from a single event. Consecutive droughts across large parts of Africa, Asia and Latin America associated in places with the double-dip La Niña, as well

as regional impacts from severe storms, cyclones and hurricanes, have significantly affected livelihoods and the ability to recover from recurrent weather shocks.

Dry conditions across wide areas of South America could further threaten crop yields within this region. However, larger plantings have largely compensated for crop productivity losses throughout the continent (–3.6% in 2021 compared to 2020).¹⁰⁹ In the Caribbean, Haiti has been triply hit – by earthquakes, irregular rains and political instability – contributing to agricultural damage and significantly worsening food insecurity.

In West Africa, floods and dry spells have led to crop damage and losses in localized areas resulting in small production downturns in 2021, but the forecasted aggregate outputs for the whole continent of Africa remained above average (+2.9% in 2021 over 2020).¹¹⁰ The 2021 first season harvest in central and southern areas of East Africa was negatively affected by prolonged droughts, mostly in Kenya where maize outputs were officially estimated to be 42%–70% below average.¹¹¹ In northern parts of East Africa, the scale of seasonal flooding and its impact on crops was lower than in 2020. In Southern Africa, the second consecutive below-average rainfall season in Madagascar has led to a severe reduction in staple food production and a decline in livestock herd size. In addition, weather-related hazards, pests and diseases were expected to result in sharp harvest declines, with yield estimates

¹⁰⁶ The Integrated Food Security Phase Classification (IPC) is a common global scale for classifying the severity and magnitude of food insecurity and malnutrition. <https://www.ipcinfo.org/ipcinfo-website/resources/ipc-manual/en/>. The Cadre Harmonisé (CH) is a unifying tool for classifying the nature and severity of current and projected acute food and nutrition insecurity.

¹⁰⁷ Global Network Against Food Crises, 2021: *Global Report on Food Crises: Joint Analysis for Better Decisions. September 2021 Update*, http://www.fightfoodcrises.net/fileadmin/user_upload/fightfoodcrises/doc/resources/FINAL_GRFC2021_Sept_Update.pdf.

¹⁰⁸ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All*, https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000130141/download/?_ga=2.47516911.931354890.1634299853-763856357.1633873374.

¹⁰⁹ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report*, <https://www.fao.org/3/cb6901en/cb6901en.pdf>.

¹¹⁰ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report*, <https://www.fao.org/3/cb6901en/cb6901en.pdf>.

¹¹¹ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report*, <https://www.fao.org/3/cb6901en/cb6901en.pdf>.

50%–70% below the five-year average.¹¹² In Mozambique, Cyclone *Eloise* made landfall in late January during the region’s lean season, when vulnerabilities are at their highest, affecting communities still recovering from Cyclone *Idai* barely two years ago. According to the Government of Mozambique, more than 441 000 people were affected by the cyclone, which displaced nearly 44 000 and destroyed more than 45 000 hectares of cropland.¹¹³

Drought conditions in South-west Asia and the Middle East reduced cereal production to below-average levels, exacerbating the impacts on agriculture and food security in fragile contexts, mostly in Afghanistan and the Syrian Arab Republic. While cereal production decreased in the Middle East, wheat production in Eastern Asia reached a record high in 2021, with paddy rice outputs at high levels due to suitable weather conditions. In contrast, central China was hit by torrential rains in mid-July 2021, leading to significant loss of life and damage to property. This sparked concerns over the nation’s food supplies, as 1 million hectares of cropland – mostly corn, soybeans and peanuts – were affected, a third of which was wiped out by heavy rains.

HUMANITARIAN IMPACTS AND POPULATION DISPLACEMENT

Refugees, internally displaced people and stateless people are often among those most vulnerable to climate and weather-related hazards. Many vulnerable individuals who are displaced end up settling in high-risk areas, where they are exposed to climate and weather hazards at a range of scales. Hydrometeorological hazards and human mobility may also intersect with social and political tensions and conflict in complex settings and, therefore, require the integrated

consideration of multi-hazard disaster risk reduction measures, including early warning systems and preparedness, and longer-term sustainable development concerns, such as land use and urban planning.

CLIMATE-RELATED HAZARDS WERE A MAJOR DRIVER OF NEW DISPLACEMENT

Extreme weather, water and climate events and conditions had major and diverse impacts on population displacement and on the vulnerability of people already displaced throughout the year. From Afghanistan to Central America, droughts, flooding and other extreme events hit those least equipped to recover and adapt.¹¹⁴ As in previous years, many of the largest-scale displacements in 2021 occurred in populous Asian countries. Most disaster displacements in 2021 resulted from tropical storms and floods in East Asia and the Pacific, South Asia, the Americas and Sub-Saharan Africa.

Over the course of 2021, hazardous hydro-meteorological events and environmental degradation further contributed to the displacement of millions more people in exposed and vulnerable situations. This includes the impact of rapid-onset events such as floods, storms and wildfires, as well as slow-onset processes such as drought and desertification. This affects people’s safety and ability to meet their basic needs for survival such as food, water, resilient housing and productive land. Over the first half of the year in Afghanistan, for example, disasters resulted in some 22 500 new displacements, primarily linked to floods.¹¹⁵ In June, the Government declared a national drought, with 80% of the country classified as being in either severe or serious drought status, on top of escalating conflict, food insecurity, and health and socioeconomic impacts of COVID-19, with humanitarian, development and government actors foreseeing that

¹¹² Famine Early Warning Systems Network (FEWSNET), 2021: *Madagascar Food Security Alert*, <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Madagascar%20Food%20Security%20Alert%20-%20June%2010%2C%202021.pdf>.

¹¹³ <https://www.fao.org/mozambique/news/detail-events/en/c/1393190/>

¹¹⁴ <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/4/60806d124/data-reveals-impacts-climate-emergency-displacement.html>

¹¹⁵ <https://story.internal-displacement.org/2021-midyear-review/index.html>

agricultural families would very likely become displaced.¹¹⁶ People forced to leave their homes had to sell their assets and engage in dangerous work to survive, while some children were sent to work in other areas or in neighbouring countries or were married off as a way to reduce financial burdens.¹¹⁷ Displaced people in the Syrian Arab Republic, a country decimated by over a decade of conflict, also faced flooding due to heavy rainfall, with close to 142 000 internally displaced people affected in mid-January 2021.¹¹⁸ In India, more than 100 000 people were displaced between November and December 2021.¹¹⁹

In line with established trends, 2021 saw the overwhelming majority of new displacements related to hazardous weather events take place within national borders. Most of these internal displacements were triggered by tropical cyclones, floods, earthquakes and volcanic eruptions, especially in the East Asia and Pacific region. The countries with the largest numbers of displacements recorded as of October 2021 were China (more than 1.4 million displacements recorded in July), Viet Nam (more than 664 000 recorded in September), and the Philippines (more than 214 000 in July and more than 386 000 in October).¹²⁰

In East Africa, floods and droughts resulted in large-scale displacement, especially in Somalia and Ethiopia. Many of the people affected were already living in overcrowded and insecure camps for internally displaced people to which many newly flood-displaced people also moved. Farmers whose crops were devastated by desert locusts were also forced to move in search of survival assistance.¹²¹ In Sudan, Alkanaa refugee camp

was submerged by flood waters in November 2021, leaving 35 000 South Sudanese refugees in need of urgent assistance.¹²²

High-income countries were also affected. In the western parts of the United States and Canada exceptional heatwaves, drought and wildfires displaced thousands from their homes. Wildfires also compounded risks related to other hazards, further increasing the risk of displacement. For instance, 15 000 people were displaced in California in January 2021, following mandatory pre-emptive evacuation orders following heavy rains.¹²³

PROTRACTED, PROLONGED AND REPEATED DISPLACEMENT FUELLED BY HYDROMETEOROLOGICAL HAZARDS

Many displacement situations triggered by hydrometeorological events have become prolonged or protracted for people unable to return to their former homes or without options for integrating locally or settling elsewhere. At the beginning of 2021, at least 7 million people were living in internal displacement following disasters¹²⁴ related to natural hazard events in previous years, according to the Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC). The largest numbers of people in this situation were in Afghanistan, India and Pakistan, followed by Ethiopia, Sudan, Bangladesh, Niger and Yemen.¹²⁵

Due to continuing or growing risk in their areas of origin (and return) or settlement, people who have been displaced by hydrometeorological events may also be subject to repeated and frequent displacement, leaving

¹¹⁶ <https://prod.drc.ngo/about-us/for-the-media/press-releases/2021/7/drought-crisis-in-afghanistan-intensifies-risk-of-displacement>

¹¹⁷ <https://prod.drc.ngo/about-us/for-the-media/press-releases/2021/7/drought-crisis-in-afghanistan-intensifies-risk-of-displacement>

¹¹⁸ <https://reliefweb.int/disaster/fl-2021-000007-syr>

¹¹⁹ <https://www.internal-displacement.org/global-displacement-map>

¹²⁰ <https://www.internal-displacement.org/global-displacement-map>

¹²¹ <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/8/611a2bca4/displaced-somalis-refugees-struggle-recover-climate-change-brings-new-threats.html>

¹²² <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/11/619c9aea4/refugees-count-losses-floods-destroy-camp-sudan.html>

¹²³ <https://story.internal-displacement.org/2021-midyear-review/index.html>

¹²⁴ https://www.internal-displacement.org/sites/default/files/publications/documents/grid2021_idmc.pdf

¹²⁵ <https://www.internal-displacement.org/global-displacement-map>

little time for recovery between one shock and the next. In Indonesia, for example, 557 000 new disaster displacements were recorded in the first half of the year, mostly triggered by major rainy season floods. Human activities, including deforestation, urbanization and land degradation have reduced the capacity of some regions of Indonesia to absorb heavy rainfall. Between October and November 2021, well before the peak of the rainy season, heavy rainfall and flooding further displaced more than 50 000, double the figure for 2020.¹²⁶ Such situations highlight the importance of disaster preparedness and risk management, but also the importance of supporting solutions to displacement that are sustainable and supporting the resilience of people who might otherwise see their living conditions progressively eroded through repeated disasters and displacement.

HAZARDOUS EVENTS AND CHANGING CLIMATIC CONDITIONS ALSO ADDED TO THE MULTIPLE RISKS FACED IN CONFLICT-AFFECTED COUNTRIES BY INTERNALLY DISPLACED PEOPLE AND REFUGEES

In Yemen, people's vulnerabilities were further exacerbated by hazard events, such as floods and droughts, that have led to the destruction of shelters and infrastructure, restricted access to markets and basic services, wrecked livelihoods, facilitated the spread of deadly diseases and contributed to fatalities. In mid-April, heavy rain and flooding hit several parts of the country, affecting 7 000 people, 75% of whom were internally displaced people living in precarious conditions.¹²⁷ This contributed to population displacement in what was already the world's

fourth biggest internal displacement crisis, with over 4 million internally displaced people. The annual rainy season brings heavy rainfall, high winds and flooding, particularly to coastal areas, with thousands of families affected by flash floods in 2021. Flooding also blocks roads, impeding the delivery of life-saving assistance.¹²⁸

In Mozambique, multiple tropical storms and floods, on top of recurrent disease outbreaks and conflict, significantly increased the vulnerability of affected people,¹²⁹ including thousands of families still displaced since Cyclones *Idai* and *Kenneth* in 2019. In January, strong winds and floods from Tropical Storm *Chalane* and then Cyclone *Eloise* damaged or destroyed the shelters of over 8 700 of these internally displaced families as well as schools and hospitals.¹³⁰ These events also resulted in new displacement, with Cyclone *Eloise* displacing more than 43 300 people.¹³¹ Tens of thousands of people remain displaced and held back from recovery.¹³² The impacts of compounding disasters, recurrent disease outbreaks and conflicts have significantly increased the vulnerability of people in the region. This situation, and similar ones in other regions, could be ameliorated through greater effort to reduce climate-related vulnerability and risks in fragile and conflict-affected contexts and to strengthen community-based preparedness.¹³³

Nigeria also experienced drought and floods, which affected agricultural activities, resulting in loss of shelter and increased vulnerability of people already displaced by conflict in the north-east. The situation further deteriorated in the first half of 2021, with around 294 000 new displacements reported between January and June 2021.¹³⁴

¹²⁶ <https://story.internal-displacement.org/10-internal-displacement-situations-to-watch-in-2022/index.html>

¹²⁷ https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Humanitarian%20Update_May%202021%20v4.pdf

¹²⁸ <https://reliefweb.int/report/yemen/climate-crisis-exacerbates-humanitarian-situation-yemen-enar>

¹²⁹ <https://www.unhcr.org/news/briefing/2021/4/606c17bf4/unhcr-scales-response-thousands-flee-attacks-northern-mozambique.html>

¹³⁰ <https://displacement.iom.int/reports/mozambique-%E2%80%93-93-flash-report-16-tropical-cyclone-eloise-january-2021?close=true>

¹³¹ <https://reliefweb.int/report/afghanistan/internal-displacement-mid-year-10-situations-review>

¹³² <https://www.unhcr.org/news/stories/2020/3/5e6a6e50b/year-people-displaced-cyclone-idai-struggle-rebuild.html>

¹³³ <https://www.unhcr.org/news/stories/2020/3/5e6a6e50b/year-people-displaced-cyclone-idai-struggle-rebuild.html>

¹³⁴ <https://www.unhcr.org/news/stories/2020/3/5e6a6e50b/year-people-displaced-cyclone-idai-struggle-rebuild.html>

In Bangladesh, monsoon rains led to massive flooding and the displacement of millions of people following Cyclone Yaas in May and June 2021. Flooding in July 2021 in the Rohingya refugee sites in Cox's Bazar damaged over 6 000 shelters and more than 25 000 refugees were forced to seek shelter in communal facilities or with other families.¹³⁵ Floods also heavily affected people living in China, Nepal and the Philippines, where thousands of people were displaced by Typhoon *In-fa* in July 2021. Without preparedness measures undertaken in the camp areas, including the strengthening of shelters, the building of retaining structures on hillsides and improved drainage, roads and bridges, these impacts would have been far worse.

CLIMATE IMPACTS ON ECOSYSTEMS

Ecosystems – including terrestrial, freshwater, coastal and marine ecosystems – and the services they provide, are affected by the changing climate, and some are more vulnerable than others.¹³⁶ In addition, some ecosystems are degrading at an unprecedented rate, limiting their ability to support human well-being and harming their adaptive capacity to build resilience.¹³⁷

For example, mountain ecosystems – the water towers of the world – are vulnerable and can be profoundly affected by climate change due to their low capacity to adapt. This may

affect the 1.9 billion people living in mountain areas or directly downstream from them.¹³⁸ Climate change may exacerbate water stress, especially in areas of decreased precipitation and where groundwater is already depleted, affecting agricultural production, arable land, and the more than 2 billion people who already experience water stress.¹³⁹

Climate change is also affecting climate-sensitive species. There is evidence that temperature-sensitive plants are flowering and starting to produce leaves earlier in spring and dropping their leaves later in autumn.¹⁴⁰ Also, there has been a clear shift in the timing of marine and freshwater fish spawning events and animal migrations worldwide. Substantial changes in species' abundance and distribution may in turn affect the interactions between species.^{141,142} Risks to ecosystems and individual species from pests, pathogens and diseases are changing. Climate change also exacerbates other threats to biodiversity. The number of species projected to become extinct increases dramatically as global temperature rises – and is 30% higher at 2 °C warming than at 1.5 °C warming.¹⁴³

Meanwhile, large-scale changes have been observed in marine ecosystems, including declining ocean productivity, migration of species to higher latitudes and altitudes, and damage to coral reefs and mangroves. Warming towards 1.5 °C will increase water temperatures and change the ocean's

¹³⁵ <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/7/6103c43c4/floods-bring-new-misery-rohingya-refugees-bangladesh-camps.html>

¹³⁶ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Adaptation Gap Report 2020*, <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020>.

¹³⁷ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

¹³⁸ Immerzeel, W. W.; Lutz, A. F.; Andrade, M. et al. Importance and Vulnerability of the World's Water Towers. *Nature* **2020**, 577 (7790), 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>.

¹³⁹ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

¹⁴⁰ Hemming, D.L.; Garforth, J.; Park, T. et al. Phenology of Primary Producers. In *State of the Climate in 2020*, supplement. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, 102 (8), S57–S60. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0098.1>.

¹⁴¹ Scheffers, B. R.; De Meester, L.; Bridge, T.C. et al. The Broad Footprint of Climate Change from Genes to Biomes to People. *Science* **2016**, 354 (6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>.

¹⁴² Thackeray, S. J.; Henrys, P. A.; Hemming, D. et al. Phenological Sensitivity to Climate across Taxa and Trophic Levels. *Nature* **2016**, 535 (7611), 241–245. <https://doi.org/10.1038/nature18608>.

¹⁴³ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

chemistry (for example, acidification), resulting in new ecosystems. Species that are less able to relocate are projected to experience high rates of mortality and decline.¹⁴⁴ Climate change is also affecting the Greenland and Antarctic ice sheets and increasing the chances of the Arctic Ocean being ice-free in the summer, further disrupting ocean circulation and Arctic ecosystems.¹⁴⁵

Rising temperatures heighten the risk of irreversible loss of marine and coastal

ecosystems, including seagrass meadows and kelp forest. Coral reefs are especially vulnerable to climate change. They are projected to lose between 70% and 90% of their former coverage area at 1.5 °C of warming and over 99% at 2 °C. Between 20% and 90% of current coastal wetlands are at risk of being lost by the end of this century, depending on how fast sea levels rise. This will further compromise food provision, tourism and coastal protection, among other ecosystem services.¹⁴⁶

¹⁴⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.

¹⁴⁵ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

¹⁴⁶ United Nations Environment Programme (UNEP), 2021: *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*, <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

Northern hemisphere summer extremes: the role of the quasi-stationary planetary waves and the Arctic warming amplification

José Álvaro Silva (WMO)

2021 NORTHERN HEMISPHERE EXTREMES: BRIEF DESCRIPTION

In 2021, during the boreal summer, several extreme weather and climate events occurred in the mid-latitude regions of the northern hemisphere (NH). Record hot days and heatwaves, severe droughts, powerful and destructive wildfires, and heavy rain events led to vast damage and high death tolls, as is described in depth in the section on [High-impact events in 2021](#).

Hot summer conditions started early, and several NH regions experienced extreme heat in June, including North Africa, Eastern Europe and the Middle East. The high temperatures were particularly exceptional in the north-western United States and western Canada in late June (Figure 23). Lytton, in British Columbia, recorded 49.6 °C on 29 June, which was a new record for Canada. On 9 July, during one of the multiple heatwaves that affected the south-western United States during the summer, the Furnace Creek weather station (Death Valley, California), reached

54.4 °C for the second year in a row (the world's highest recorded temperature in at least the last 90 years).

On 14 and 15 July, exceptional severe floods occurred in some countries in the Western part of Europe. Parts of western Germany and eastern Belgium were the most affected by the long-lasting heavy precipitation. Just a few days later, in the Chinese province of Henan, more rain fell on Zhengzhou between 17 and 21 July than falls there in an average year, and a one-hour rainfall total of 201.9 mm, on 20 July, was a new record for China.

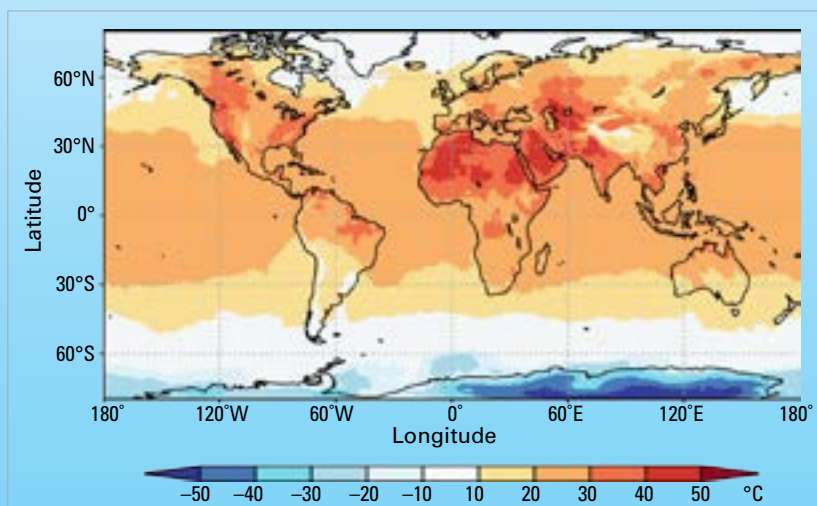
In August, the extreme heat was associated with powerful and destructive wildfires that affected some Mediterranean countries. On 11 August, a station near Syracuse, in Sicily, Italy, reached 48.8 °C, a provisional European record.

POTENTIAL CAUSES AND MECHANISMS OF NORTHERN HEMISPHERE SUMMER EXTREMES

Following the trend that has emerged in recent decades, NH summer 2021 saw numerous weather and climate extremes. But what might be the causes for the increase in number and the intensification of the NH summer extremes?

The frequency of certain types of weather and climate extremes is increasing due to climate change,¹ and some attribution studies^{2,3,4,5,6,7,8} have shown that it has made many single recent events more intense. Some of these studies suggest that a wide diversity of spatio-temporal scales and atmospheric processes are involved in the evolution of extreme events, but it is usually the anomalous large-scale circulation patterns that set the background for their occurrence, and quasi-resonant circulation regimes play an important role here.

Figure 23. ERA5 reanalysis of maximum air temperature (°C) on 29 June 2021. Source: Copernicus Climate Change Service and KNMI Climate Explorer.



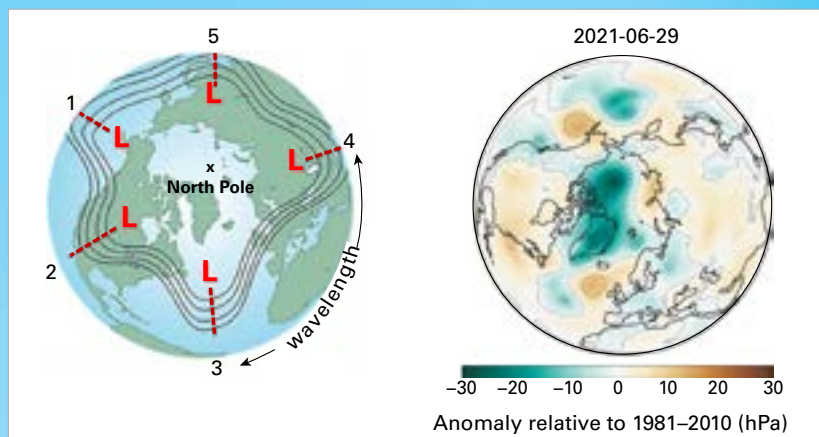
THE QUASI-RESONANT AMPLIFICATION

There is growing evidence that physical mechanisms involving atmospheric dynamics, in particular planetary wave dynamics, can explain the characteristics associated with persistent disturbances in the polar jet stream and NH summer extremes.^{9,10,11} The Rossby waves¹² (Figure 24), particularly the quasi-resonant amplification (QRA)¹³ of these mid-latitude high-amplitude waves (zonal wavenumber 6–8), is an important mechanism driving the conditions associated with extremes.^{14,15,16} The jet stream plays a major role in shaping weather patterns, and when it becomes weaker and wavier, in association with these slow-moving waves, the air motion from west to east is slowed, leading to blocking situations in which weather systems remain near-stationary over a prolonged period which can last several weeks.^{17,18}

ARCTIC WARMING AMPLIFICATION

Over the past 50 years, temperatures in the Arctic have increased at more than twice the global rate,¹⁹ a prominent feature of climate change known as Arctic amplification (AA).²⁰ The AA influences mid-latitude summer circulation by weakening the storm tracks, shifting the position of the jet stream and amplifying the quasi-stationary waves. While some uncertainties related to how these dynamical changes affect regional weather conditions remain,²¹ it is generally accepted that in recent decades the occurrence of conditions favourable for QRA^{22,23} promoted the occurrence of persistent extreme weather events that might be linked to the amplified Arctic warming, and thus that climate change influence is carried through amplified arctic warming.²⁴ Nevertheless, it is argued that the observations and climate-model simulations do not support a clear cause–effect relation, making it difficult to establish a definite link.

The causes of AA are not yet fully understood, but as highlighted in Chapter 4 of the Working Group I contribution to the IPCC Sixth Assessment Report, the understanding of the physical mechanisms driving AA has improved in the last decade, and the results of several

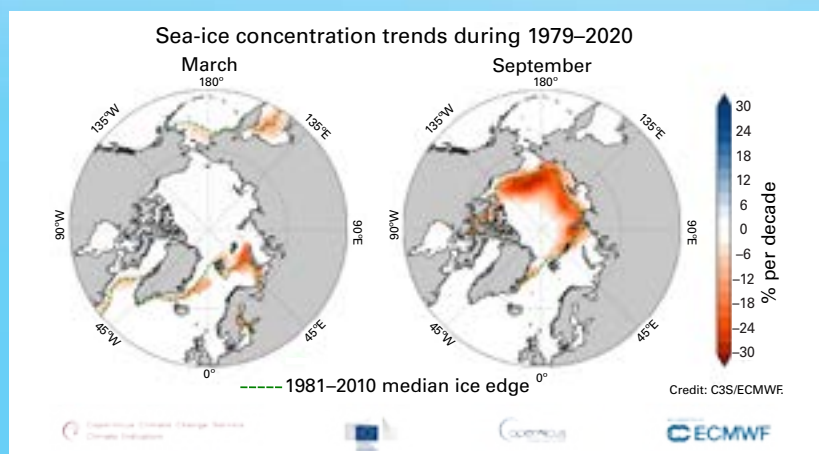


studies mentioned in the report identify a variety of processes and positive feedbacks contributing to these phenomena.²⁵ The first is related to sea-ice loss (Figure 25), which causes a change of surface albedo (reflective ice is replaced by the darker ocean), leading to more heat absorption from solar radiation. This is known as the sea-ice albedo feedback. Other important atmospheric processes inducing AA are the temperature (both Planck and lapse rate) and the cloud and water vapour feedbacks.²⁶ Increases in the atmospheric and oceanic equator-to-pole transport of heat and moisture have also been identified as drivers of AA.

In summary, research focusing on summer circulation and climate change needs to be further developed to fill important knowledge gaps, but there is evidence to support the idea that changes in mid-latitude summer circulation – amplified and more stationary planetary waves, a weaker and wavier jet stream – associated with Arctic warming, may be linked to increased blocking situations thus favouring the occurrence of extreme events in the NH.

Figure 24. Left: Schematic example of a five planetary-wave pattern. Source: NOAA/NWS. Right: Sea level pressure anomaly for 29 June 2021 (difference from 1981–2010), associated with a slow and meandering jet stream. Data from the ERA5 reanalysis product. Source: Copernicus Climate Change Service.

Figure 25. Sea-ice concentration trends in March and September, 1979–2020. Source: C3S, <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-ice>.



REFERENCES

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
2. Philip, S. Y.; Kew, S. F.; van Oldenborgh, G. J. et al. Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. *Earth System Dynamics Discussions*, In review, 1–34. Preprint: <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.
3. Kreienkamp, F.; Philip, S. Y.; Tradowsky, J. S. et al. *Rapid Attribution of Heavy Rainfall Events Leading to the Severe Flooding in Western Europe During July 2021*. World Weather Attribution, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>.
4. van Oldenborgh, G. J.; van der Wiel, K.; Kew, S. et al. Pathways and Pitfalls in Extreme Event Attribution. *Climatic Change* **2021**, *166* (1), 13. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>.
5. Herring, S. C.; Christidis, N.; Hoell, A. et al., Eds.; Explaining Extreme Events of 2017 from a Climate Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2019**, *100* (1), S1–S117. <https://doi.org/10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2017.1>.
6. Lu, C.; Lott, F.; Sun Y. et al. Detectable Anthropogenic Influence on Changes in Summer Precipitation in China. *Journal of Climate* **2020**, *33* (13), 5357–5369. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0285.1>.
7. Kahraman, A.; Kendon, E. J.; Chan, S. C. et al. Quasi-stationary Intense Rainstorms Spread across Europe under Climate Change. *Geophysical Research Letters* **2021**, *48* (13), e2020GL092361. <https://doi.org/10.1029/2020GL092361>.
8. Sun, Y.; Dong, S.; Zhang X. et al. Anthropogenic Influence on the Heaviest June Precipitation in Southeastern China since 1961. In: *Explaining Extremes of 2017 from a Climate Perspective*, supplement. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2019**, *100* (1), S79–S84. <https://doi.org/10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2017.1>.
9. Mann, M. E.; Rahmstorf, S.; Kornhuber, K. et al. Projected Changes in Persistent Extreme Summer Weather Events: The Role of Quasi-resonant Amplification. *Sci. Advance* **2018**, *4* (10), eaat3272. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3272>.
10. Coumou, D.; Petoukhov, V.; Rahmstorf, S. et al. Quasi-resonant Circulation Regimes and Hemispheric Synchronization of Extreme Weather in Boreal Summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2014**, *111* (34), 12331–12336. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>.
11. Petoukhov, V.; Petri, S.; Rahmstorf, S. et al. Role of Quasiresonant Planetary Wave Dynamics in Recent Boreal Spring-to-autumn Extreme Events. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2016**, *113* (25), 6862–6867. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606300113>.
12. A Rossby wave is a large horizontal atmospheric undulation associated with the polar jet stream and separates cold polar air from warm tropical air. These planetary waves play an important role in the poleward transports of energy and moisture.
13. The amplified Rossby waves associated with a meandering jet stream become slow and cause wave resonance known as quasi-resonant amplification (QRA).
14. Petoukhov, V.; Rahmstorf, S.; Petri, S. et al. Quasiresonant Amplification of Planetary Waves and Recent Northern Hemisphere Weather Extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2013**, *110* (14), 5336–5341. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222000110>.
15. Kornhuber, K.; Petoukhov, V.; Petri, S. et al. Evidence for Wave Resonance as a Key Mechanism for Generating High-amplitude Quasi-stationary Waves in Boreal Summer. *Climate Dynamics* **2016**, *49* (5), 1961–1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3399-6>.
16. Kornhuber, K.; Coumou, D.; Vogel, E. et al. Amplified Rossby Waves Enhance Risk of Concurrent Heatwaves in Major Breadbasket Regions. *Nature Climate Change* **2020**, *10* (1), 48–53. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0637-z>.
17. Teng, H.; Branstator, G.; Wang, H. et al. Probability of US Heat Waves Affected by a Subseasonal Planetary Wave Pattern. *Nature Geoscience* **2013**, *6* (12), 1056–1061. <https://doi.org/10.1038/ngeo1988>.
18. Grams, C. M.; Binder, H.; Pfahl, S. et al. Atmospheric Processes Triggering the Central European Floods in June 2013, *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2014**, *14* (7), 1691–1702. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1691-2014>.

19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
20. Francis, J. A.; Vavrus, S. J. Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-latitudes. *Geophysical Research Letters* **2012**, *39* (6), L06801. <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>.
21. Coumou, D.; Di Capua, G.; Vavrus, S. et al. The Influence of Arctic Amplification on Mid-latitude Summer Circulation. *Nature Communications* **2018**, *9* (1), 2959. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8>.
22. Petoukhov, V.; Rahmstorf, S.; Petri, S. et al. Quasiresonant Amplification of Planetary Waves and Recent Northern Hemisphere Weather Extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2013**, *110* (14), 5336–5341. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222000110>.
23. Kornhuber, K.; Petoukhov, V.; Petri, S. et al. Evidence for Wave Resonance as a Key Mechanism for Generating High-amplitude Quasi-stationary Waves in Boreal Summer. *Climate Dynamics* **2016**, *49* (5), 1961–1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3399-6>.
24. Mann, M.; Rahmstorf, S.; Kornhuber, K. et al. Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. *Scientific Reports* **2017**, *7* (1), 45242. <https://doi.org/10.1038/srep45242>.
25. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
26. Previdi, M.; Smith, K. L.; Polvani, L. M. Arctic Amplification of Climate Change: A Review of Underlying Mechanisms. *Environmental Research Letters* **2021**, *16* (9), 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>.

Observational basis for climate monitoring

Climate monitoring is performed by a system of observing systems covering the atmosphere, the ocean, hydrology, the cryosphere and the biosphere. Each of these areas is monitored in different ways by a range of organizations. Cutting across all these areas, satellite observations provide major contributions to global climate monitoring.

In 1992, the Global Climate Observing System (GCOS) was established by WMO, the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), the United Nations Environment Programme (UNEP) and the International Science Council (ISC) to coordinate and facilitate the development and improvement of global climate observations. GCOS has identified a set of Essential Climate Variables (ECVs) that together provide the information necessary to understand, model and predict the trajectory of the climate as well as plan mitigation and adaptation strategies (Figure 26). The status of the observational basis for these ECVs is published in regular

status reports. GCOS also identifies what is needed to improve the system in implementation reports.

In addition to observations provided by the GCOS-coordinated Global Surface Network (GSN) and Global Upper-Air Network (GUAN), National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs) of WMO Members provide a more comprehensive and widespread network of observation, acquired primarily for operational weather prediction. WMO's Global Basic Observing Network (GBON), a globally designed network with prescribed capabilities and observing schedules and for which international data exchange is mandatory, will provide critically needed observations for numerical weather prediction and will help substantially strengthen climate monitoring.

In order to provide the necessary financial and technical assistance for the implementation and operation of GBON in the poorest and most poorly observed areas of the globe, WMO and the members of the Alliance for

2016 Essential Climate Variables (ECVs)			
Atmospheric	Surface	Physical	Hydrology
	Upper air		Cryosphere
	Composition		Biosphere
Oceanic		Biogeochemical	Human use of natural resources
			Biological/ecosystems
			Terrestrial
		Marine habitat properties, plankton	

Figure 26. Essential Climate Variables (ECVs) identified by GCOS

Hydromet Development^a are establishing a Systematic Observations Financing Facility (SOFF).

Complementing the observations of the physical and dynamic properties of the atmosphere, WMO's Global Atmospheric Watch (GAW) coordinates atmospheric composition measurements, ensuring that reliable and accurate data are obtained from measurements made by WMO Members, research institutions and/or agencies and other contributing networks.

Ocean observations of ocean physics, biogeochemistry, biology and ecosystems are coordinated through the Global Ocean Observing System (GOOS). The GOOS Observations Coordination Group (OCG) monitors the performance of these observations^b and produces an annual Ocean Observing System Report Card. Ocean observations are generally made widely available to international users.

In the terrestrial domain, there is a wider group of observing networks. Hydrological observations are generally operated by NMHSs

and coordinated through WMO. A number of specialized Global Terrestrial Networks (GTNs), for example, on hydrology, permafrost, glaciers, land use, and biomass, also report to GCOS. Data exchange agreements are generally less developed for the terrestrial networks, and many important observations are not made available to international users.

The Committee on Earth Observation Satellites/Coordination Group for Meteorological Satellites (CEOS/CGMS) Joint Working Group on Climate (WGClimate) bases the development of satellite observations for climate on the ECV requirements established by GCOS. It has produced an ECV Inventory that includes records for 766 climate data records for 33 ECVs covering 72 separate ECV products, with more planned. Satellite observations have some advantages – they have near-global coverage – but optical observations can be interrupted by clouds. Used with ground-based observations, either as complementary data sets, or for validation and calibration, they form an invaluable part of the global observing system.

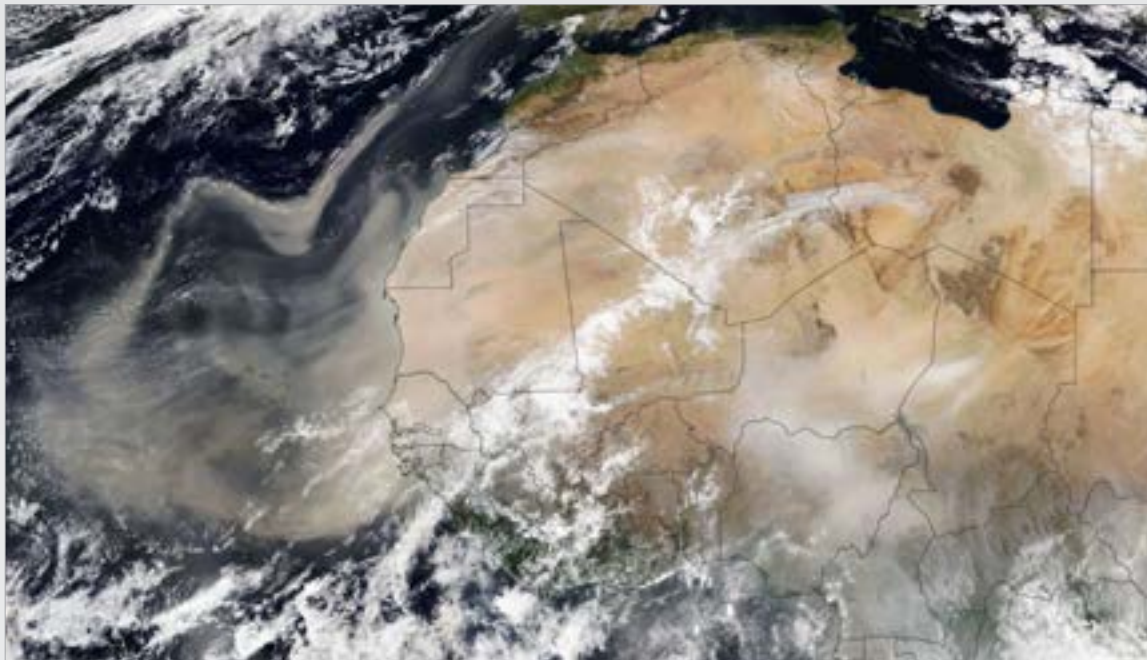


Figure 27. Dust storm in the Sahara Desert on 18 February 2021. This event led to widespread poor air quality for several days and followed another one, earlier in the month, that coated the snow in the Pyrenees and Alps and turned skies orange in some parts of Europe, including France, Germany and Switzerland.

^a <https://public.wmo.int/en/our-mandate/how-we-do-it/partnerships/wmo-office-of-development-partnerships>

^b <https://www.ocean-ops.org/>

Can sub-seasonal-to-seasonal predictions improve disaster risk preparedness for the South-east Asia region?

A review of the 20–26 September 2021 case study

**Estelle De Coning¹, Thea Turkington²,
Frederic Vitart³, Andrew Robertson⁴, Ryan Kang²,
Wee Leng Tan²**

¹ WMO

² National Environment Agency, Singapore

³ S2S Co-chair, European Centre for Medium Range Weather Forecasts

⁴ S2S Co-chair, International Research Institute for Climate and Society

South-east Asia (SEA) is in a prime location to benefit from sub-seasonal-to-seasonal (S2S) climate services, as a region with some of the highest skill at the S2S timescale. The Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) Specialised Meteorological Centre (ASMC) and partners (UN ESCAP,^a RIMES,^b the AHA Centre^c) are working to develop S2S products in SEA for disaster risk reduction under the S2S SEA Pilot Project, which is part of the S2S Prediction Project real-time pilot initiative undertaken by WMO, the World Weather Research Programme (WWRP) and the World Climate Research Programme (WCRP). The project aims to explore the usefulness of S2S predictions for disaster risk reduction.

Between 20 and 26 September 2021, more than 50 000 people^d were affected by floods in the Philippines, and Sulawesi and eastern Borneo in Indonesia. During the same week, Tropical Cyclone *Dianmu* contributed to severe floods in parts of Viet Nam, Cambodia and Thailand, affecting more than 180 000 people.^e Based on the S2S SEA Pilot Project's predictions, a small increased chance of extreme rainfall

was forecasted for south-eastern Indonesia three weeks before the case study week. This evolved by the week before to a moderate increase in chance for Sulawesi, Maluku Islands and West Papua and expanded to small increase in chance over parts of Thailand, Lao People's Democratic Republic, Viet Nam, and southern Philippines, southern Sumatra, eastern Borneo and Java. This outlook was reported in the AHA Centre's weekly report^f to national disaster management organizations and others, supporting the preparations for *Dianmu*^g and other hazards along with subsequent weather forecasts, an example in the region of steps towards a seamless prediction approach.

These results are typical of the findings of the pilot project so far, where increased chance of extreme rainfall for the Maritime Continent is a good indicator three weeks beforehand that one or more hazardous events may occur in the general area. The indicator works less well for mainland South-east Asia though, where the outlooks often only predict an increased chance one week before. Increased probabilities of hazardous events signal an increased probability of disaster as well. While there may not always be an indication of impending hazardous events at the sub-seasonal timescale, the relatively small number of false alarms means that action can be taken at the sub-seasonal timescale, such as targeted monitoring of the development of the events and activating institutional processes earlier so that preparedness and response are more efficient.

^a United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific: <https://www.unescap.org/>

^b Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System for Africa and Asia: <https://www.rimes.int/>

^c ASEAN Coordinating Centre for Humanitarian Assistance on Disaster Management: <https://ahacentre.org/>

^d <https://adinet.ahacentre.org>

^e <https://adinet.ahacentre.org>

^f https://ahacentre.org/wp-content/uploads/2021/09/DWeek_37_13-19Sep2021.pdf

^g <https://ahacentre.org/flash-update/flash-update-no-01-tropical-depression-21w-twentyone-viet-nam-23-september-2021/>

Data sets and methods

GREENHOUSE GAS DATA

Estimated concentrations from 1750 are used to represent pre-industrial conditions. Calculations assume a pre-industrial mole fraction of 278 ppm for CO₂, 722 ppb for CH₄ and 270 ppb for N₂O.

World Data Centre for Greenhouse Gases operated by Japan Meteorological Agency <https://gaw.kishou.go.jp/>.

World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin – No. 17: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020*. Geneva, 2021.

World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre operated by Environment and Climate Change Canada <https://woudc.org/home.php>.

GLOBAL TEMPERATURE DATA

GLOBAL MEAN TEMPERATURE TIME SERIES

The method for calculating global mean temperature anomalies relative to an 1850–1900 baseline has been updated since the *State of the Global Climate 2020* report. The method was updated to take advantage of the assessment made by Working Group I, in its contribution to the IPCC Sixth Assessment Report, of long-term change and its uncertainty. The new method also makes use of a wider range of shorter data sets that are routinely updated to provide an authoritative assessment of recent temperature changes.

In the 2020 report (and earlier reports), changes relative to the 1850–1900 baseline were based on the HadCRUT4 data set which was the only data set that extended back to 1850. Other data sets were offset to match the average of HadCRUT4 over the period 1880–1900 (NASA GISTEMP and NOAA GlobalTemp) or 1981–2010 (ERA5, JRA-55).

In 2021, the IPCC Sixth Assessment Report Working Group I assessed change from 1850–1900 to other periods based on an average of four data sets – HadCRUT5, Berkeley Earth, NOAA–Interim and Kadow et al. (2020) – which all extend back to 1850. They assessed uncertainty by considering the range from the four estimates, taken from the lower bound of the uncertainty range of the coolest data set to the upper bound of the uncertainty range of the warmest. By making use of four data sets that extend back to 1850, Working Group I was able to make a more comprehensive estimate of uncertainty.

As two of the four IPCC data sets are not regularly updated, in the present report the estimate made by the IPCC for the temperature change between 1850–1900 and 1981–2010 is combined with estimated changes between 1981–2010 and the current year from six data sets to calculate anomalies for 2021 relative to 1850–1900.

There is good, though not perfect, agreement between the six data sets on changes from 1981–2010 to the present, as this is a period with good observational coverage. The additional modest uncertainty from the spread of the six data sets is combined with that of the IPCC's estimate of the uncertainty in the change from 1850–1900 to 1981–2010.

More precisely, six data sets (cited below) were used in the calculation of global temperature. Global mean temperature anomalies were calculated relative to an 1850–1900 baseline using the following steps:

1. The starting point was a time series of global annual mean temperatures for each data set, as provided by the data providers. The anomalies were presented on different baselines.
2. For each data set, anomalies were calculated relative to the 1981–2010 average by subtracting the average for the period 1981–2010.
3. The amount 0.69 °C was added to each series, based on the estimated difference between 1850–1900 and 1981–2010, calculated using the method from the IPCC Sixth Assessment Report Working Group I (the number is provided in the caption for Figure 1.12 in that report).
4. The mean and standard deviation of the six estimates were calculated.
5. The uncertainty in the IPCC estimate was combined with the standard deviation, assuming the two are independent and assuming the IPCC uncertainty range (0.54 °C to 0.79 °C) is representative of a 90% confidence range (1.645 standard deviations).

The number quoted in this report for 2021 (1.11 ± 0.13 °C) was calculated in this way with 1.11 °C being the mean of the six estimates.

Annual temperature maps

The method for calculating the map of annual temperature anomalies has also been updated. In the 2020 report, a map showing anomalies relative to 1981–2010 from a single data set (ERA5) was used. While the map was based on a single data set, the accompanying assessment was based on all available data sets.

For the map of temperature anomalies for 2021, a median value of five of the data sets was used – HadCRUT5, ERA5, NOAA GlobalTemp, Berkeley Earth and GISTEMP – regrided to the spatial grid of the lowest resolution data sets (NOAA GlobalTemp and HadCRUT5 data sets), which are presented on a 5° latitude by 5° longitude grid. The median is used in preference to the mean to minimize the effect of potential outliers. The half-range of the data sets provides an indication of the uncertainty. The spread between the data sets is largest at high latitudes and in Central Africa, both regions with sparse data coverage.

The following six data sets were used:

Berkeley Earth – Rohde, R. A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* **2020**, *12*, 3469–3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

ERA5 – Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2020**, *146* (730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

GISTEMP v4 – GISTEMP Team, 2022: *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
Lenssen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, *124* (12): 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.

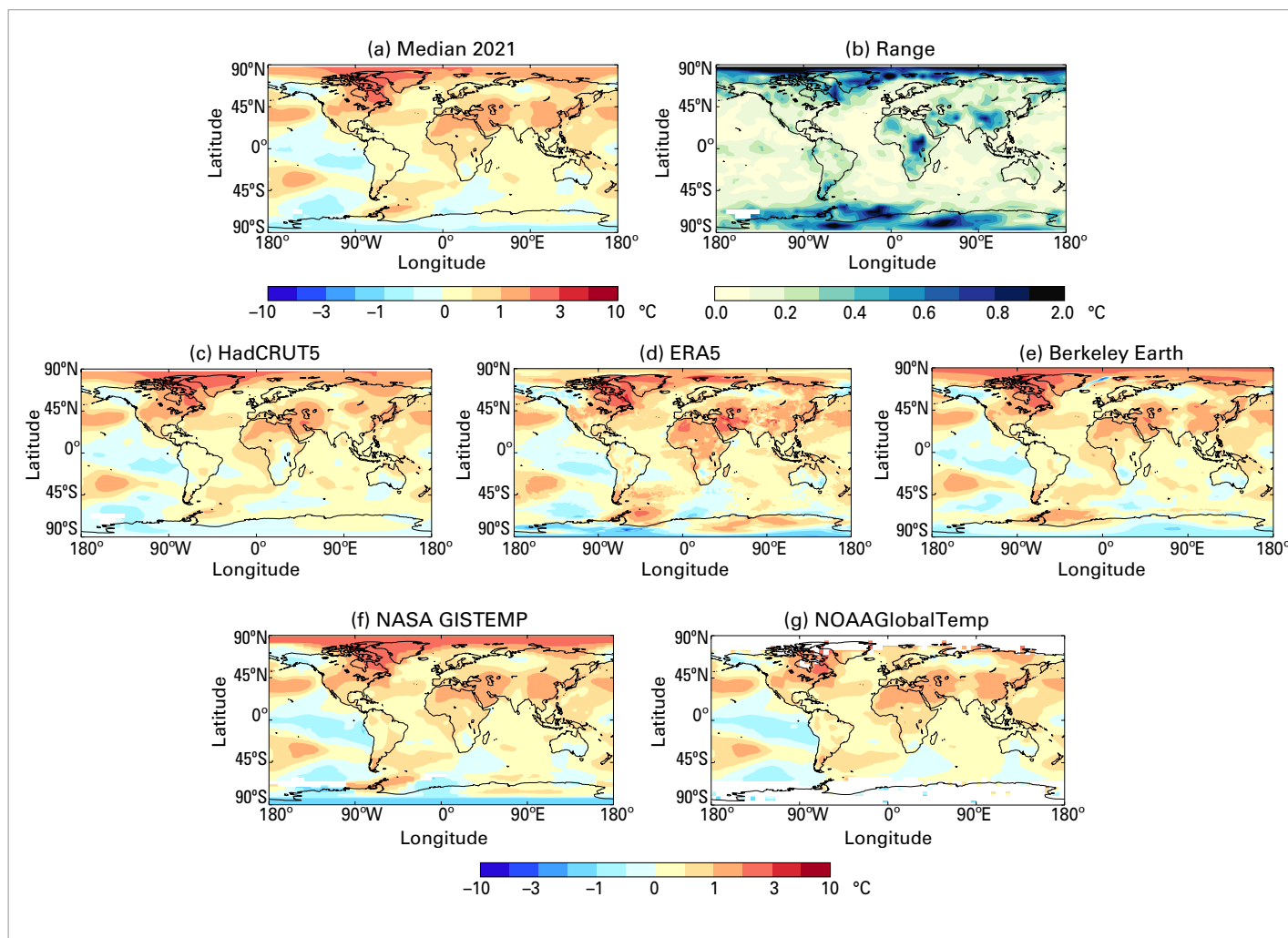
HadCRUT.5.0.1.0 — Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A. et al. An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2021**, *126* (3), e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT.5.0.1.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5> on 24 October 2021 and are © British Crown Copyright, Met Office 2021, provided under an Open Government License, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

JRA-55 — Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y. et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **2015**, *93* (1), 5–48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/93/1/93_2015-001_article.

NOAAGlobalTemp v5 — Zhang, H.-M., et al., NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 5.0. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5FN144H. Huang, B.; Menne, M. J.; Boyer, T. et al. Uncertainty Estimates for Sea Surface Temperature and Land Surface Air Temperature in NOAAGlobalTemp Version 5. *Journal of Climate* **2020**, *33* (4), 1351–1379. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/4/jcli-d-19-0395.1.xml>.

Figure 28.

(a) Near-surface air temperature anomalies for 2021 relative to the 1981–2010 average for the median of five data sets on a 5° grid. (b) Range of the five estimates; near surface temperature anomalies on the native resolution grid of the dataset for (c) HadCRUT5 (5° resolution), (d) ERA5 (0.25°), (e) Berkeley Earth (1°), (f) GISTEMP (2°) and (g) NOAAGlobalTemp (5°).



OCEAN HEAT CONTENT DATA

Data used for estimates up to 2021:

- Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015, *Science Advances* **2017**, 3 (3), e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.
- Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* **2017**, 13, 163–167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.
- Lyman, J. M.; Johnson, G. C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate* **2014**, 27 (5), 1945–1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.
- von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How well can we derive Global Ocean Indicators from Argo data? *Ocean Science* **2011**, 7 (6), 783–791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>.

In addition, data used up to 2020:

- Desbruyères, D. G.; Purkey, S. G.; McDonagh, E. L. et al. Deep and abyssal ocean warming from 35 years of repeat hydrography, *Geophysical Research Letters* **2016**, 43 (19), 310–356. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.
- Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ–Based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height, *Journal of Climate* **2016**, 29 (4), 1305–1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.
- Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. *JAMSTEC Report of Research and Development* **2008**, 8, 47–59. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_0_47/_article.
- Kuusela M.; Stein, M. L. Locally stationary spatio-temporal interpolation of Argo profiling float data. *Proceedings of the Royal Society A* **2018**, 474, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.
- Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2 000 m) 1955–2010. *Geophysical Research Letters* **2012**, 39 (10), L10603. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.
- Li, H.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a global gridded Argo data set with Barnes successive corrections, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2017**, 122 (2), 866–889, <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.
- Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program, *Progress in Oceanography* **2009**, 82 (2), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.
- von Schuckmann, K.; Le Traon, P. -Y.; Smith, N. et al., Eds. Copernicus Marine Service Ocean State Report, *Journal of Operational Oceanography* **2018**, 11, S1–S142. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1489208>.

SEA LEVEL DATA

GMSL from CNES/Aviso+ <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-acces.html#c12195>

MARINE HEATWAVE AND MARINE COLD SPELL DATA

Marine heatwaves (MHWs) are categorized as moderate when the sea-surface temperature (SST) is above the 90th percentile of the climatological distribution for five days or longer; the subsequent categories are defined with respect to the difference between the SST and the climatological distribution average: strong, severe or extreme, if that difference is,

respectively, more than two, three or four times the difference between the 90th percentile and the climatological distribution average (Hobday et al., 2018). Marine cold spell (MCS) categories are analogous, but are categorized with reference to sea-surface temperatures below the 10th percentile.

The baseline used for MHWs and MCSs is 1982–2011, which is shifted by one year from the standard normal period of 1981–2010 because the first full year of the satellite SST series on which it is based is 1982.

Hobday, A.J.; Oliver, E. C. J.; Sen Gupta, A. et al. Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography* **2018**, 31 (2), 1–13. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>.

NOAA OISST v2: Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST): Banzon, V.; Smith, T. M.; Chin, T. M. et al. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth System Science Data* **2016**, 8 (1), 165–176. <https://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016>.

GLACIER MASS BALANCE DATA

Glacier mass balance data for the global network of reference glaciers are available from the World Glacier Monitoring Service (WGMS), <https://www.wgms.ch>. Data for the 2020–2021 mass balance year are preliminary, and are based on a subset of 32 (out of a total of ~42) WGMS reference glaciers. The glacier mass balance data for western Canada are based on multi-year, bi-annual (April and September) repeat LiDAR surveys conducted by Brian Menounos at the University of Northern British Columbia, Canada, as described in Pelto et al. (2019).

Pelto, B. M.; Menounos, B.; Marshall, S. J. Multi-year evaluation of airborne geodetic surveys to estimate seasonal mass balance, Columbia and Rocky Mountains, Canada. *The Cryosphere* **2019**, 13 (6), 1709–1727. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1709-2019>.

Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* **2021**, 592, 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>.

GREENLAND AND ANTARCTIC ICE SHEET DATA

Greenland ice sheet mass balance data are reported from three sources. Modelled changes in surface mass balance and total mass balance from 1985 to 2021 are based on the average of three regional climate and mass balance models, described in Mankoff et al. (2021). An alternative estimate of 2021 mass balance is given in the NOAA Arctic Report Card (Moon et al., 2021), based on satellite observations of melt area and surface mass balance models driven by the PROMICE surface weather station network. Satellite gravity data of total ice sheet mass balance from the GRACE and GRACE-FO missions are available from Wiese et al. (2019, updated to 2021). These data are available for both the Greenland and Antarctic ice sheets.

Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week. *Earth System Science Data* **2021**, 13 (10), 5001–5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.

Moon, T. A.; Tedesco, M.; Box, J. E. et al. Greenland Ice Sheet. In *Arctic Report Card 2021*; Moon, T. A.; Druckenmiller, M. L.; Thoman, R. L., Eds.; National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. <https://doi.org/10.25923/546g-ms61>.

Wiese, D.N.; Yuan, D. -N; Boening, C. et al. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06M CRI Filtered Version 2.0, Ver. 2.0, PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ62>.

SNOW DATA

Snow data and monthly anomaly time series charts are available at: <https://climate.rutgers.edu/snowcover/files/wmo/rutgers-nh-sce-anomalies-2020-21-data.xlsx>

SEA-ICE DATA

The sea ice section uses data from the EUMETSAT OSI SAF Sea Ice Index v2.1 (OSI-SAF, based on Lavergne et al., 2019) and the NSIDC v3 Sea Ice Index (Fetterer et al., 2017). Sea-ice concentrations are estimated from microwave radiances measured from satellites. Sea-ice extent is calculated as the area of ocean grid cells where the sea-ice concentration exceeds 15%. Although there are relatively large differences in the absolute extent between data sets, they agree well on the year-to-year changes and the trends. In this report, NSIDC data are reported for absolute extents (for example, “18.95 million km²”) for consistency with earlier reports, while rankings are reported for both data sets.

EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, Sea ice index 1979-onwards (v2.1, 2020), OSI-420, Data extracted from OSI SAF FTP server: 1979–2020, Northern and Southern Hemisphere. <https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-420>.

Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al. 2017, updated daily. *Sea Ice Index, Version 3*. Boulder, Colorado USA. National Snow and Ice Data Center (NSIDC). <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>.

Lavergne, T.; Sørensen, A. M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records. *The Cryosphere* **2019**, 13 (1), 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.

PERMAFROST DATA

Noetzli, J.; Christiansen, H. H.; Hrbáček, F. et al. Global Climate Permafrost Thermal State. In *State of the Climate in 2020*; Dunn, R. J., Aldred, H., F., Gobron, N. Eds.; *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, 102 (8); S42–S44. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0098.1>.

Smith, S. L.; Romanovsky, V. E.; Isaksen, K. et al. Permafrost. In *State of the Climate in 2020*; Druckenmiller, M. L., Moon, T., Thoman, R., Eds.; *Bulletin of the American Meteorological Society*, **2021**, 102 (8); S293–S297. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0086.1>.

PRECIPITATION DATA

These Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) data sets were used in the analysis:

- First Guess Monthly, doi: 10.5676/DWD_GPCC/FG_M_100.
- Monitoring Product (Version 2020), doi: 10.5676/DWD_GPCC/MP_M_V2020_100.
- Full Data Monthly (Version 2020), doi: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2020_100.
- First Guess Daily, doi: 10.5676/DWD_GPCC/FG_D_100.
- Full Data Daily (Version 2020), doi: 10.5676/DWD_GPCC/FD_D_V2020_100.

List of contributors

CONTRIBUTING MEMBERS AND TERRITORIES

Algeria, Andorra, Argentina, Armenia, Australia, Austria, Bahrain, Barbados, Belarus, Belgium, Belize, Bosnia and Herzegovina, Botswana, British Caribbean Territories, Bulgaria, Burkina Faso, Cameroon, Canada, Chile, China, Colombia, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Egypt, Estonia, Finland, France, Gambia, Georgia, Germany, Greece, Grenada, Guinea, Guinea-Bissau, Hong Kong, China; Hungary, India, Islamic Republic of Iran, Ireland, Israel, Italy, Japan, Jordan, Kazakhstan, Kenya, Latvia, Liberia, Libya, Lithuania, Luxembourg, Macao, China; Madagascar, Mali, Malta, Mauritius, Morocco, New Zealand, Niger, Nigeria, North Macedonia, Norway, Pakistan, Peru, Philippines, Poland, Portugal, Republic of Moldova, Romania, Russian Federation, Rwanda, Saint Vincent and the Grenadines, Saudi Arabia, Senegal, Serbia, Slovakia, Slovenia, South Africa, Spain, Saint Kitts and Nevis, Sudan, Sweden, Switzerland, Syrian Arab Republic, Thailand, Netherlands, Togo, Trinidad and Tobago, Tunisia, Turkey, Ukraine, United Kingdom, United Republic of Tanzania, United States of America, Uruguay, Uzbekistan, Zimbabwe

INSTITUTIONAL CONTRIBUTORS

ARC Centre of Excellence for Climate Extremes, University of Tasmania, Australia; Birmingham Institute of Forest Research, Birmingham University, UK; British Antarctic Survey (BAS); Bureau of Meteorology (BoM), Australia; Carbon Portal, Lund University, Sweden; Centre National d'Études Spatiales, CNES, France; Mercator Ocean international, France; Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), France; IFREMER, France; University of Brest, France; Centre National de la Recherche Scientifique, (CNRS), France; Institut de Recherche pour le Développement (IRD), France; Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), France; Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), France; Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), France; CELAD, France; Sorbonne Université, France; Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, France; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences; Copernicus Climate Change Service (C3S); CSIRO Oceans and Atmosphere, Australia; Danmarks Meteorologiske Institut (DMI); Global Precipitation Climatology Centre, Deutscher Wetterdienst (GPPC, DWD); Environment and Climate Change Canada (ECCC); ETH Zürich, Switzerland; European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF); George Washington University, USA; Hong Kong Observatory; Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP, CAS); Japan Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC); Joint Institute for Marine and Atmospheric Research, University of Hawai'i (JIMAR), USA; Met Office Hadley Centre, UK; Department of Atmosphere, Ocean and Earth System Modeling Research, Meteorological Research Institute, Japan; National Environment Agency, Singapore (NEA); National Oceanographic and Atmosphere Administration, National Centers for Environmental Information (NOAA NCEI), USA; NOAA, Pacific Marine Environmental Laboratory (NOAA PMEL), USA; National Oceanography Centre (NOC), UK; Natural Resources Canada; Norwegian Meteorological Institute; Rutgers University, USA; Scripps Institution of Oceanography, USA; Tokyo Climate Center, Japan Meteorological Agency (TCC, JMA); Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil; University of Exeter, UK; University of Victoria, Canada; Woods Hole Oceanographic Institution, USA; World Climate Research Programme (WCRP); World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)

UNITED NATIONS AGENCIES

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), United Nations Environment Programme (UNEP), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR), International Organization for Migration (IOM), World Food Programme (WFP), Intergovernmental Oceanographic Commission – United Nations (IOC-UNESCO)

INDIVIDUAL CONTRIBUTORS

Signe Aaboe (Norwegian Meteorological Institute), Jorge Alvar-Beltrán (FAO), Omar Baddour (WMO publication coordinator), Jessica Blunden (NOAA NCEI), Tim Boyer (NOAA NCEI), Anny Cazenave (LEGOS CNES and OMP), Lijing Cheng (IAP; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences), Louis Clement (National Oceanography Centre), Kyle Clem (University of Victoria), Estelle De Coning (WMO), Damien Desbruyères (IFREMER, CNRS, IRD, Laboratoire d’Océanographie Physique et Spatiale), Maxx Dilley (WMO), Robert Dunn (Met Office Hadley Centre), Simon Eggleston (WMO/GCOS), Thomas Estilow (Rutgers University), Florence Geoffroy (UNHCR), Donata Giglio (University of Colorado), Nathan Gillett (ECCC), John Gilson (Scripps Institution of Oceanography, University of California), Loretta Hieber Girardet (UNDRR), Atsushi Goto (TCC, JMA), Yvan Gouzenes (LEGOS and OMP), Stephan Gruber (Carleton University), Debbie Hemming (Met Office Hadley Centre, Birmingham Institute of Forest Research), Ana Heureux (FAO), Shigeki Hosoda (JAMSTEC), Matthias Huss (ETH Zürich), Kirsten Isensee (IOC UNESCO), Gregory C. Johnson (NOAA, PMEL), Ryan Kang (NEA), Maarten Kappelle (UNEP), John Kennedy (lead author, Met Office Hadley Centre), Valentina Khan (Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation), Rachel Killick (Met Office Hadley Centre), Brian A. King (NOC), Animesh Kumar (UNDRR), Mikael Kuusela (Carnegie Mellon University), Gernot Laganda (WFP), Thomas Lavergne (Norwegian Meteorological Institute), Yuehua Li (University of New South Wales), Renata Libonati (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Juerg Luterbacher (WMO), John Lyman (NOAA, PMEL), Shawn Marshall (ECCC and University of Calgary), Jesse Mason (WFP), Brian Menounos (University of Northern British Columbia), Audrey Minière (Mercator Ocean international), Maeva Monier (CELAD/Mercator Ocean international), Colin Morice (Met Office Hadley Centre), Lev Neretin (FAO), Stoyka Natcheva (WMO), Rodica Nitu (WMO), Jeannette Noetzli (Institute for Snow and Avalanche Research), Ben Pelto (University of Northern British Columbia), Claire Ransom (WMO), Andrew Robertson (S2S co-chair, IRI), David Robinson (Rutgers University), Dean Roemmich (Scripps Institution of Oceanography), Kanako Sato (JAMSTEC), Katsunari Sato (JMA), Yousuke Sawa (JMA, WDCGG), Robert W. Schlegel (Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire d’Océanographie de Villefranche), Katherina Schoo (IOC UNESCO), Karina von Schuckmann (Mercator Ocean international), Rahul Sengupta (UNDRR), Fumi Sezaki (TCC, JMA), José Álvaro Silva (WMO), Sharon Smith (Natural Resources Canada), Michael Sparrow (WCRP), Martin Stendel (DMI), Peter Stott (Met Office Hadley Centre, University of Exeter), Dmitry Streletskiy (George Washington University), Toshio Suga (JAMSTEC, Tohoku University), Tanguy Szekely (OceanScope), Wee Leng Tan (NEA), Oksana Tarasova (WMO), Blair Trewin (BoM), Thea Turkington (NEA, Singapore), John Turner (BAS), Freja Vamborg (ECMWF), Alex Vermeulen (Carbon Portal, Lund University), Frederic Vitart (S2S co-chair, ECMWF), Ying Wang (UNEP), Michelle Yonetani (UNHCR), Zhiwei Zhu (Nanjing University of Information Science and Technology), Markus Ziese (DWD)



Food and Agriculture Organization
of the United Nations



UNHCR
The UN Refugee Agency



UNDRR
UN Office for Disaster Risk Reduction



World Food
Programme



For more information, please contact:

World Meteorological Organization

7 bis, avenue de la Paix – P.O. Box 2300 – CH 1211 Geneva 2 – Switzerland

**Strategic Communications Office
Cabinet Office of the Secretary-General**

Tel: +41 (0) 22 730 83 14

Email: communications@wmo.int

public.wmo.int