



## Десять научных соображений о рисках и возможностях для живых организмов в Антарктике

Julian Gutt<sup>1</sup>, Enrique Isla<sup>2</sup>, José C. Xavier<sup>3,4</sup>, Byron J. Adams<sup>5</sup>, In-Young Ahn<sup>6</sup>, C.-H. Christina Cheng<sup>7</sup>, Claudia Colesie<sup>8</sup>, Vonda J. Cummings<sup>9</sup>, Huw Griffiths<sup>4</sup>, Ian Hogg<sup>10, 11</sup>, Trevor McIntyre<sup>12</sup>, Klaus M. Meiners<sup>13</sup>, David A. Pearce<sup>14</sup>, Lloyd Peck<sup>4</sup>, Dieter Piepenburg<sup>1</sup>, Ryan R. Reisinger<sup>15</sup>, Grace K. Saba<sup>16</sup>, Irene R. Schloss<sup>17, 18, 19</sup>, Camila N. Signori<sup>20</sup>, Craig R. Smith<sup>21</sup>, Marino Vacchi<sup>22</sup>, Cinzia Verde<sup>23</sup> and Diana H. Wall<sup>24</sup>

(1) Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Columbusstr., 27568 Bremerhaven, Germany. Julian.Gutt[at]awi.de

(2) Institute of Marine Sciences-CSIC, Passeig Maritim de la Barceloneta 37-49, Barcelona, 08003, Spain

(3) University of Coimbra, MARE - Marine and Environmental Sciences Centre, Faculty of Sciences and Technology, Portugal

(4) British Antarctic Survey, Natural Environmental Research Council, High Cross, Madingley Road, Cambridge CB3 0ET, UK

(5) Department of Biology and Monte L. Bean Museum, Brigham Young University, Provo, USA

(6) Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, Incheon 21990, Republic of Korea (South Korea)

(7) University of Illinois, Department of Evolution, Ecology and Behavior, Urbana, USA

(8) School of GeoSciences, University of Edinburgh, Alexander Crum Brown Road, Edinburgh, EH9 3FF, UK

(9) National Institute of Water and Atmosphere Research Ltd (NIWA), 301 Evans Bay Parade, Greta Point, Wellington, New Zealand

(10) School of Science, University of Waikato, Private Bag 3105, Hamilton 3240, New Zealand

(11) Canadian High Antarctic Research Station, Polar Knowledge Canada, PO Box 2150, Cambridge Bay, Nunavut, X0B 0C0, Canada

(12) Department of Life and Consumer Sciences, University of South Africa, Private Bag X6, Florida, 1710, South Africa

(13) Australian Antarctic Division, Department of Agriculture, Water and the Environment, and Australian Antarctic Program Partnership, University of Tasmania, 20 Castray Esplanade, Battery Point, TAS 7004, Australia

(14) Department of Applied Science, Faculty of Health and Life Sciences, Northumbria University at Newcastle, Northumberland Road, Newcastle-upon-Tyne, NE1 8ST, UK

(15) Centre d'Etudes Biologique de Chizé, UMR 7372 du Centre National de la Recherche Scientifique - La Rochelle Université, 79360 Villiers en Bois, France

(16) Center for Ocean Observing Leadership, Department of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University, 71 Dudley Rd., New Brunswick, NJ 08901, USA

(17) Instituto Antártico Argentino, Buenos Aires, Argentina

(18) Centro Austral de Investigaciones Científicas, Bernardo Houssay 200, Ushuaia, Tierra del Fuego CP V9410CAB, Argentina

(19) Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Ushuaia, Tierra del Fuego CP V9410CAB, Argentina

(20) Oceanographic Institute, University of São Paulo, Praça do Oceanográfico, 191, CEP: 05508-900, São Paulo, Brazil

(21) Department of Oceanography, University of Hawaii at Manoa, 1000 Pope Road, Honolulu, HI 96822, USA

(22) Institute for the study of the anthropic impacts and the sustainability of the marine environment (IAS), National Research Council of Italy (CNR), Via de Marini 6, 16149 Genoa, Italy

(23) Institute of Biosciences and BioResources (IBBR), National Research Council (CNR), Via Pietro Castellino 111, I-80131 Naples, Italy

(24) Department of Biology and School of Global Environmental Sustainability, Colorado State University, Fort Collins, USA

DOI: [10.48361/2срpq-8t02](https://doi.org/10.48361/2срpq-8t02)

**Краткий обзор:**

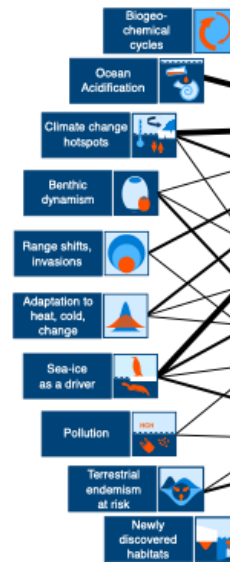
- На основе научно-исследовательской программы СКАР «Границы Антарктики - устойчивость и адаптация экосистемы» (AnT-ERA, 2013-2021), 26 экспертов осуществили синтез своих знаний о том, как влияет и какие риски несет с собой изменение климата для биологических процессов и функционирования экосистем в Антарктике<sup>1</sup>.
- Десять основных соображений, возникших на эту тему у ученых, касались следующих аспектов: (1) ускорение морских и наземных биогеохимических циклов, (2) реакция на окисление океана, (3) экологические изменения в «горячих точках» изменения климата, (4) неожиданная динамика сообществ морского дна, (5) сдвиги биоразнообразия, (6) ограничения, накладываемые низкими температурами на синтез белка, (7) принципиально сильная зависимость жизни организмов от изменения состояния морского льда, (8) загрязнение, (9) генетически различные наземные популяции, находящиеся под угрозой, и (10) недавно обнаруженные среды обитания.
- Две трети литературы, включенной в данный синтез, были опубликованы в период с 2010 по 2020 год, и только одна треть была опубликована ранее.
- Быстрое развитие событий последнего десятилетия свидетельствует о том, что различные биологические сообщества Антарктики испытывают климатический стресс в настоящее время или будут испытывать его в ближайшие десятилетия.
- Реакции со стороны организмов, функций экосистем и экосистемных услуг на изменения окружающей среды сложны и разнообразны. Пробелы в ключевых знаниях остаются, и их необходимо восполнить, чтобы адекватно оценить будущие перспективы живых организмов в Антарктике.

## Подробный обзор:

26 экспертов, представляющих разнообразные важные для Антарктики научные дисциплины, выявили наиболее актуальные научные исследования биологических и экологических процессов и функций на всех уровнях биологической организации морских, наземных и пресноводных экосистем Антарктики<sup>1</sup> (рис. 0). Эти научные исследования представляют собой широкий спектр от исследований биосинтеза молекул, который играет важную роль в адаптации и пластичности организмов, формируя биоразнообразие<sup>2</sup>, до исследований экосистем, в том числе их устойчивости (или способности к самовосстановлению); исследований биологических взаимодействий, таких как отношения «хищник-жертва»; биогеохимических циклов; экосистемных услуг<sup>3,5,6</sup>. Результаты, имеющие широкое научное значение, особую новизну и очевидную значимость для заинтересованных сторон, были сгруппированы в десять основных соображений. В настоящей статье представлено сжатое описание этих ключевых соображений. Так как в статье цитируется только основная литература, полный список см. у Gutt et al.<sup>1</sup>.

**(1) Климатический стресс усиливает перенос элементов между организмами и окружающей средой (биогеохимические циклы).** Таяние льда увеличивает выброс питательных веществ в наземные и морские экосистемы (рис. 1). Потеря ледовой массы также приводит к появлению новых наземных и морских сред обитания, что, в свою очередь (отчасти из-за увеличения поступления питательных веществ), приводит к увеличению чистого фотосинтеза и биомассы. В исключительные периоды повышенной мутности воды или при определенных погодных условиях биологическая активность может подавляться.

## Ten messages on Antarctic ecosystems in transition



## Research applications in the Southern Ocean and Antarctica

Рисунок 0. Связи между десятью научными ключевыми соображениями, касающимися Антарктики и Южного океана (краткие формулировки) и областями прикладных исследований, касающимися в основном экосистемных продуктов и услуг (пользы, приносимой человеку природой). Более сильные связи даны более толстыми линиями.

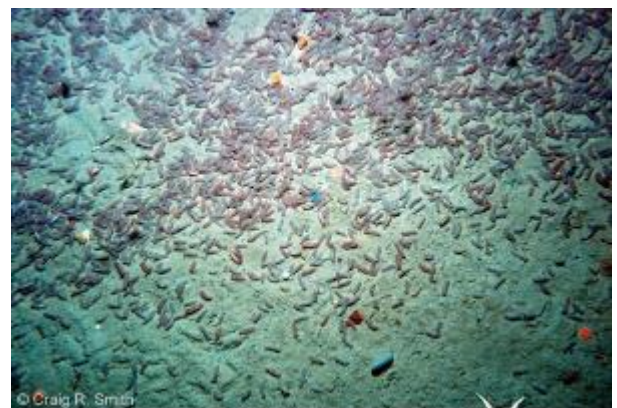


Рисунок 1. Морские огурцы обычно образуют колонии на глубоководном морском дне, но могут также плотными скоплениями встречаться на антарктических шельфах, особенно в условиях изобилия пищи. Они вносят значительный вклад в реминерализацию органических частиц, которые погружаются из верхней толщи воды на дно. © Craig R. Smith

**(2) Различные виды по-разному реагируют на окисление океана: некоторые могут акклиматизироваться, однако реакции экосистемы неизвестны.** Реакции первичных продуцентов, в том числе рост и фотосинтез, отличаются от вида к виду и зависят от продолжительности воздействия. На ранних стадиях жизненного цикла (например, вылупление криля, развитие раковины моллюска) организмы обычно более уязвимы. Долгосрочные исследования показывают, что существует потенциал развития компенсаторных реакций на окисление. Прогнозирование изменений на уровне сообществ и экосистем требует знаний о том, какие ключевые виды и функциональные группы подвержены и не подвержены воздействию окисления. Также следует учитывать сочетание с другими факторами стресса и в особенности — способность организмов адаптироваться в долгосрочной перспективе.



Рисунок 2. Кораллы могут в изобилии встречаться в ряде мест Южного океана. Из-за наличия ценостеума они особенно уязвимы перед окислением океана. © J. Gutt & W. Dimmler, AWI/MARUM

**(3) В «горячих точках» изменения климата идут быстрые изменения морских и наземных экосистем.** Регион Западноантарктического полуострова может быть «моделью» судьбы других антарктических районов, где существуют биологические «горячие точки», на которые влияет климат. Изменения особенностей местных условий, а также изменения региональных ветров, качества и протяженности льда, стратификации толщи воды влияют на появление цветения водорослей в районе Западноантарктического полуострова (рис. 3). Прибрежные районы, такие как фьорды Западноантарктического полуострова, представляют собой место обитания большой биомассы криля и китов, а также уникальных сообществ видов на морском дне. Эти богатые районы могут оказаться под угрозой из-за изменения климата — в особенности там, где отступают ледники.

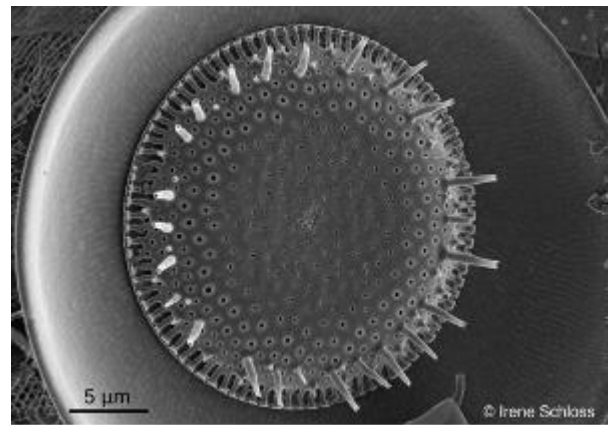


Рисунок 3. Микроводоросли, такие как диатомовые водоросли *Thalassiosira scottia*, чутко реагируют изменением своего состава и роста на изменения температуры и динамики морского льда. © Irene Schloss

**(4) Сообщества морского дна демонстрируют неожиданную динамику — от взрывного роста до массовой смертности.** В течение десятилетий считалось, что организмы и сообщества морского дна Антарктики являются медленно растущими (рис. 4). Однако некоторые недавние исследования, охватывающие период от нескольких лет до нескольких десятилетий, показывают, что губки и асцидии могут расти быстрее, чем ожидалось, а также иметь высокий уровень смертности из-за изменения условий шельфовых ледников и морского льда и отступления ледников, которые обусловлены климатом.



Рисунок 4. Стекланные губки чувствительны к непостоянству условий окружающей среды. Некоторые виды растут быстрее, чем считалось ранее, но они также могут демонстрировать более высокий уровень смертности. © J. Gutt & W. Dimmler, AWI/MARUM

**(5) Изменения окружающей среды и усиление следов человеческой деятельности вызывают сдвиги ареалов обитания видов и вторжение неместных видов.** Ожидается, что ареалы обитания большинства морских видов будут смещаться к полюсу и стягиваться, однако некоторые виды демонстрируют признаки стяжения на севере. На суше по мере отступления ледников увеличивается доступность среды обитания. В благоприятных условиях, например на Антарктическом полуострове, это может приводить к повышению продуктивности наземных растений, что также называется «позеленением Антарктики» (рис. 5). Неместные виды, преимущественно наземные, завезенные человеком, могут укорениться и изменить функции изначальной экосистемы.



Рисунок 5. Растительность Антарктики представлена по большей части мхами и лишайниками, чей ареал в регионе увеличивается в связи с потеплением. © Claudia Colesie

**(6) В плане температурной устойчивости реакции видов являются слабыми, сложными и разнообразными.** Наземные виды обладают значительной способностью пережить потепление, тогда как морские виды такой способностью не обладают. Однако наземные виды уязвимы для циклов замерзания-оттаивания. Маловероятно, что генетическая адаптация будет успевать за быстрыми изменениями окружающей среды, поскольку для большинства видов характерно протяженное время жизни поколений. Как высокие, так и низкие температуры могут вызвать распад или повреждение белков. У морских видов при низких температурах это влияет на функции организма, в том числе замедляет темпы роста и воздействует на снабжение кислородом, а цитоглобины помогают бороться с повреждением (рис. 6). Обусловленные низкими температурами ограничения также могут стимулировать функциональные инновации белков и появление низкотемпературных белков. Активные в условиях холода ферменты могут быть одной из самых многообещающих целей биоразведки.

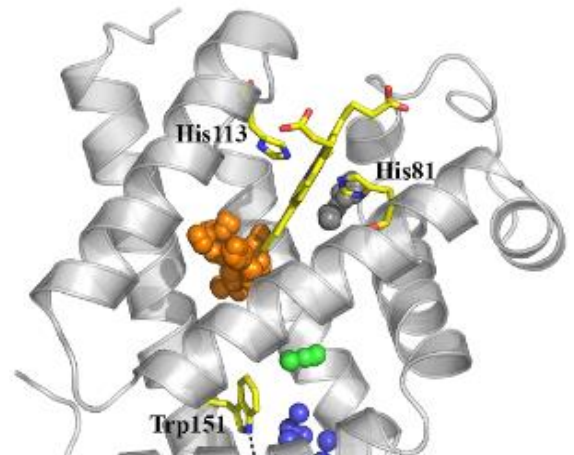


Рисунок 6. Структура белка цитоглобина антарктического клыкача *Dissostichus mawsoni*. Цитоглобины важны для снабжения кислородом и борьбы с повреждением белков у антарктических рыб.  
© Daniela Giordano, Cinzia Verde

**(7) Морской лед в значительной степени управляет функционированием почти всех компонентов морской экосистемы.** Изменение состояния морского льда, в том числе его протяженности, концентрации и длительности существования, оказывает серьезное воздействие на трофические отношения в морской среде, в том числе на систему «диатомовые водоросли — криль — высший хищник», а также на сообщества морского дна (рис. 7). Кроме того, изменчивость морского льда влияет на наличие и качество мест нагула и размножения таких групп хищников, как пингвины и тюлени.



Рисунок 7. Тюлени-крабодеды обитают в зоне паковых льдов и поэтому чувствительны к изменениям протяженности и динамики морского льда. © Ryan Reisinger

**(8) В Антарктике все чаще обнаруживаются известные и новые загрязнители, однако реакции организмов и сообществ по-прежнему недостаточно изучены.** Экосистемы Антарктики поглощают антропогенные биологически накапливающиеся стойкие органические загрязнители (СОЗ) и тяжелые металлы. Наряду с этим в наземных и морских средах обитания и в организмах Антарктики все чаще обнаруживается макро- и микропластик.



Рисунок 8. Морские птицы, такие как чернобровый альбатрос, страдают от загрязнителей и мусора в воде, например от микропластика и потерянных рыболовных снастей. © José Xavier

**(9) Континентальная биота высокоэндемична и, следовательно, подвержена риску в результате изменения климата.** В результате таяния льда повышается связность наземных сред обитания. Далее в свою очередь возрастает дисперсия организмов и смешение популяций, которые генетически более различны, чем считалось ранее (рис. 9). Соответственно, конкуренция за ресурсы между популяциями и видами может усиливаться, в особенности по мере того, как среды обитания будут становиться все более связными. Кроме того, вероятно развитие новых ниш и/или благоприятных мест обитания для инвазивных видов.



Рисунок 9. Усиленное отступление льда на суше и озерах приводит к смешению популяций нематод, которые из-за оледенения ранее были изолированными. © Byron Adams

**(10) Недавно обнаруженные редкие, фрагментарные и небольшие сообщества, процветающие в определенных условиях окружающей среды, особенно уязвимы перед климатическими рисками.** В особых средах обитания была обнаружена высокоадаптированная биота, характеризующаяся уникальным биоразнообразием и выполняющая уникальные экосистемные функции. К таким средам обитания относятся подледниковые озера; нижняя поверхность или среда под шельфовыми ледниками; гидротермальные выходы и источники; также геотермальные среды обитания на суше; скопления кораллов; подводные возвышения (рис. 10).



Рисунок 10. Эта многорукая морская звезда (*Freyella fragilissima*) обитает только под шельфовыми ледниками и в глубоководном море. Поскольку шельфовые ледники разрушаются из-за потепления климата, выживание подобных видов оказывается под угрозой. © J. Gutt & W. Dimmler, AWI/MARUM

## **Задачи:**

В ходе исследований предыдущих лет было получено резко увеличивающееся количество доказательств того, что ряд важных компонентов экосистем в Антарктике и Южном океане уже испытывают экологический стресс или, как ожидается, будут подвергаться еще большему риску в будущем<sup>7,8,9,10,11</sup>. Для улучшения качества прогнозов о том, как живые организмы в Антарктике будут реагировать на изменение климата, требуется дополнительная базовая информация о долгосрочной естественной изменчивости моделей и процессов в сочетании с лучшим пониманием функционирования экосистем<sup>12</sup>. Для достижения этой цели необходимо проводить больше круглогодичных и многолетних наблюдений. Междисциплинарные метеорологические экологические исследования должны иметь большой временной и пространственный масштаб и обеспечивать основу для анализа и выявления воздействия нескольких факторов экологического стресса<sup>13</sup>. Кроме того, достоверная информация об адаптационных способностях ключевых видов и экологических функций, включая взаимодействия, может стать основой для разработки надежных сценариев будущего.

Ряд тем недостаточно представлен в научной литературе, в том числе, например, реминерализация мертвой биомассы в новые питательные вещества (рециркуляция) на морском дне и реакция организмов на загрязнение. Эти темы признаны важными в экологическом контексте и представляют собой знание, необходимое для нахождения ответов на насущные вопросы. Для достижения научного прогресса в этой области перспективны, среди прочего, следующие подходы: более широкое использование автономных платформ для отбора проб (например, робото-технических плотов, беспилотных летательных и подводных аппаратов), быстро совершенствующиеся неинвазивные методы визуализации и акустические методы для биологических исследований, анализ средовой ДНК и экологическое моделирование. Они могут помочь не только в разработке ясных в пространственном отношении прогнозов на будущее, но и в определении ключевых экологических функций.

## **Вывод:**

Прошедшее десятилетие было очень успешным для исследований биологических и экологических процессов и функций в Антарктике и Южном океане. Теперь мы знаем, что изменение климата приведет к появлению победителей и проигравших среди экологически ключевых видов, увеличению и уменьшению биоразнообразия и первичной продукции, а также к изменению биогеохимических функций<sup>14,15,16</sup>.

Мы делаем вывод, что наши актуальные знания о следе человеческой деятельности представляют собой информацию, необходимую для формирования политики Договора об Антарктике и национального законодательства, направленных на поддержание здоровья антарктических экосистем. Уже на данном этапе оправдана расширенная защита антарктической биоты от рисков, связанных с изменением климата, загрязнением и другими антропогенными нарушениями<sup>17,18</sup>.

Мы также значительно улучшили понимание того, какие процессы, регионы или организмы в Антарктике необходимо рассмотреть, чтобы прояснить будущее всех экосистем Антарктики и разработать новые дизайны комплексных исследований экосистем<sup>4,19</sup>.

И, наконец, наш синтез также подчеркивает, что основные успехи в антарктических исследованиях, проводимых на основе вопросов, зависят от хорошего баланса между прикладными научными подходами (такими как решение проблем климата, сохранения и управления экосистемами) и академической свободой проводить фундаментальные исследования, которые, в свою очередь, становятся информационным источником для прикладных подходов.



## Литература:

1. J. Gutt, E. Isla, J. Xavier, B. Adams, et al, Antarctic ecosystems in transition – life between stresses and opportunities. *Biological Reviews* (2020). Doi: 10.1111/brv.12679
2. L.S. Peck, Antarctic marine biodiversity: adaptations, environments and responses to change. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* **56**, 105–236 (2018)
3. G.K. Saba, W.R. Fraser, V.S. Saba, R.A. Iannuzzi, et al, Winter and spring controls on the summer food web of the coastal West Antarctic peninsula. *Nature Communications* **5**, 4318 (2014). Doi: 10.1038/ncomms5318
4. A.J. Constable, D.P. Costa, O. Schofield, L. Newman, et al, Developing priority variables (“ecosystem Essential Ocean variables” – eEOVs) for observing dynamics and change in Southern Ocean ecosystems. *Journal of Marine Systems* **161**, 26–41 (2016). Doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.05.003.
5. C.K. Lee, D.C. Laughlin, E.M. Bottos, T. Caruso, et al, Biotic interactions are an unexpected yet critical control on the complexity of an abiotically driven polar ecosystem. *Communications Biology* **2**, 62 (2019). Doi: 10.1038/s42003-018-0274-5
6. A.D. Rogers, B.A.V. Frinault, D.K.A. Barnes, N.L. Bindoff, et al, Antarctic futures: an assessment of climate-driven changes in ecosystem structure, function, and service provisioning in the Southern Ocean. *Annual Review of Marine Science* **12**, 87–130 (2020). Doi: 10.1146/annurev-marine-010419-011028
7. J. Turner, N.E. Barrand, T.J. Bracegirdle, P. Convey, et al, Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record* **50**, 237–259 (2014). Doi: 10.1017/S0032247413000296
8. P. Convey, L.S. Peck, Antarctic environmental change and biological responses. *Science Advances* **5**, eaaz0888 (2019). Doi: 10.1126/sciadv.aaz0888
9. M. Meredith, M. Sommerkorn, S. Cassotta, C. Derksen, et al, Polar regions. In: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M., Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J., Petzold, B. Rama and N. M. Weyer (eds) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. (2019), pp 203–320.
10. S.L. Chown, C.M. Brooks, The state and future of Antarctic environments in a global context. *Annual Review of Environment and Resources* **44**, 1–30 (2019). Doi: 10.1146/annurev-environ-101718-033236
11. S.A. Morley, D. Abele, D.K.A. Barnes, C.A. Cárdenas, et al, Global drivers on Southern Ocean ecosystems: changing physical environments and anthropogenic pressures in an earth system. *Frontiers in Marine Science* **7**, 1–24 (2020). doi: 10.3389/fmars.2020.547188
12. M.C. Il Kennicutt, D. Bromwich, D. Liggett, B. Njåstad, et al, Sustained Antarctic research: a 21st century imperative. *One Earth* **1**, 95–113 (2019). Doi: 10.1016/j.oneear.2019.08.014
13. J. Gutt, N. Bertler, T.J. Bracegirdle, A. Buschmann, et al, The Southern Ocean ecosystem under multiple climate stresses - an integrated circumpolar assessment. *Global Change Biology* **21**, 1434–1453 (2015). Doi: 10.1111/geb.12794
14. H.J. Griffiths, A.J.S. Meijers, T.J. Bracegirdle, More losers than winners in a century of future Southern Ocean seafloor warming. *Nature Climate Change* **7**, 749–755 (2017). Doi: 10.1038/NCLIMATE3377
15. M.A. Hindell, R.R. Reisinger, Y. Ropert-Coudert, L. Hückstädt, et al, Tracking of marine predators to protect Southern Ocean ecosystems. *Nature* **580**, 87–92 (2020). doi: 10.1038/s41586-020-2126-y

16. S.F. Henley, E.L. Cavan, S.E. Fawcett, R. Kerr, et al, Changing biogeochemistry of the Southern Ocean and its ecosystem implications. *Frontiers in Marine Science* **7**, 581 (2020). Doi: 10.1098/rsta.2017.0168
17. H. Flores, A. Atkinson, S. Kawaguchi, B.A. Krafft, et al, Impact of climate change on Antarctic krill. *Marine Ecology Progress Series* **458**, 1–19 (2012). Doi: 10.3354/meps09831
18. K.A. Hughes, A. Constable, Y. Frenot, J. López-Martínez, et al, Antarctic environmental protection: strengthening the links between science and governance. *Environmental Science & Policy* **83**, 86–95 (2018). Doi: 10.1016/j.envsci.2018.02.006
19. J. Gutt, E. Isla, N. Bertler, G.E. Bodeker, et al, Cross-disciplinarity in the advance of Antarctic ecosystem research. *Marine Genomics* **37**, 1–17 (2018). Doi: 10.1016/j.margen.2017.09.006

**Key words**

Climate-change, biological processes and responses, Antarctic Thresholds – Ecosystem Resilience and Adaptation (AnT-ERA)