

TRANSFORMASI PEMBELAJARAN IPS BERBASIS DEEP LEARNING DALAM MEWUJUDKAN TUJUAN PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN (SDGS): KAJIAN LITERATUR

¹⁾Muhammad Sobri, ²⁾Saiful Bahri, ³⁾Muh. Zainurrahman

¹⁾Universitas Mataram, Indonesia.

²⁾³⁾ Universitas Islam Negeri Mataram, Indonesia.

muhammad.sobri@unram.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis transformasi pembelajaran Ilmu Pengetahuan Sosial (IPS) berbasis *deep learning* dalam mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*). Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur (*systematic literature review*) dengan menganalisis artikel ilmiah bereputasi yang dipublikasikan pada rentang tahun 2015–2026 melalui tahapan identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis literatur berdasarkan pedoman PRISMA serta dianalisis menggunakan teknik analisis tematik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis *deep learning* dalam IPS tidak hanya dimaknai sebagai pemanfaatan teknologi, tetapi juga sebagai pendekatan pedagogis yang menekankan pemahaman mendalam, berpikir kritis, reflektif, serta keterkaitan dengan konteks kehidupan nyata. Implementasi pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan keterampilan abad ke-21, seperti kemampuan berpikir kritis, pemecahan masalah, kolaborasi, dan kesadaran sosial peserta didik, serta berkontribusi signifikan terhadap pencapaian SDGs, khususnya pendidikan berkualitas (SDG 4), kesadaran lingkungan (SDG 13), dan penguatan nilai keadilan sosial (SDG 16). Namun demikian, implementasi pembelajaran IPS berbasis *deep learning* masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan kompetensi guru, rendahnya literasi digital, serta belum optimalnya integrasi antara pendekatan pedagogis dan teknologi. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan model pembelajaran IPS berbasis *deep learning* yang kontekstual, integratif dengan nilai-nilai SDGs dan kearifan lokal, serta didukung oleh peningkatan kapasitas guru dan kebijakan pendidikan yang adaptif.

Kata kunci: pembelajaran IPS, *deep learning*, SDGs, kajian literatur, pendidikan berkelanjutan

1. PENDAHULUAN

Pendidikan abad ke-21 menghadapi tantangan yang semakin kompleks seiring dengan perkembangan teknologi, globalisasi, dan tuntutan kompetensi masa depan. Dalam konteks ini, pembelajaran tidak lagi cukup berorientasi pada transfer pengetahuan, tetapi harus mampu mendorong keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan kesadaran sosial peserta didik. Pendekatan pembelajaran mendalam (*deep learning*) menjadi salah satu paradigma yang relevan karena menekankan pemahaman konseptual, refleksi kritis, serta keterlibatan aktif peserta didik dalam proses pembelajaran (Budhiarti et al., 2025).

Dalam pendidikan IPS, pembelajaran mendalam memiliki posisi strategis karena mata

pelajaran ini berorientasi pada pembentukan warga negara yang kritis, reflektif, dan bertanggung jawab terhadap isu-isu sosial. Studi menunjukkan bahwa penerapan *deep learning* dalam pembelajaran IPS dapat meningkatkan kemampuan berpikir reflektif, empati sosial, serta kesadaran terhadap isu lokal dan global (Kamaruddin & Saqjuddin, 2024). Dengan demikian, pembelajaran IPS tidak hanya berfungsi sebagai media transfer pengetahuan sosial, tetapi juga sebagai wahana pembentukan karakter dan kesadaran global peserta didik.

Di sisi lain, agenda global Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya tujuan keempat (SDG 4) tentang pendidikan berkualitas, menekankan pentingnya pendidikan yang inklusif, adil, dan berorientasi pada pembangunan berkelanjutan. Pendidikan diharapkan mampu

membekali peserta didik dengan kompetensi untuk menghadapi tantangan global, termasuk isu lingkungan, sosial, dan ekonomi. Dalam hal ini, integrasi pendekatan inovatif seperti deep learning menjadi penting untuk mendukung pencapaian SDGs melalui peningkatan kualitas pembelajaran (Ariansyah et al., 2023).

Perkembangan teknologi, khususnya kecerdasan buatan dan deep learning, juga telah membawa transformasi signifikan dalam dunia pendidikan. Pendekatan ini memungkinkan pembelajaran yang lebih adaptif, personal, dan berbasis data, sehingga dapat meningkatkan efektivitas proses pembelajaran (Prihantini et al., 2025). Selain itu, pemanfaatan deep learning dalam pendidikan berpotensi mendukung pencapaian berbagai target SDGs melalui peningkatan kualitas pembelajaran dan penguatan literasi digital peserta didik.

Namun demikian, implementasi pembelajaran berbasis deep learning dalam pendidikan IPS masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan infrastruktur, rendahnya literasi teknologi pendidik, serta belum optimalnya integrasi antara kurikulum dan pendekatan pembelajaran inovatif (Qomah et al., 2026). Selain itu, masih terdapat kesenjangan konseptual antara deep learning sebagai pendekatan pedagogis dan sebagai teknologi berbasis kecerdasan buatan, yang dapat mempengaruhi efektivitas implementasinya di lapangan (Fatmawati & Syafiq, 2025).

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan kajian komprehensif yang menganalisis berbagai literatur terkait transformasi pembelajaran IPS berbasis deep learning dalam mendukung pencapaian SDGs. Melalui pendekatan kajian literatur, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai konsep, implementasi, peluang, serta tantangan integrasi deep learning dalam pembelajaran IPS, sehingga dapat menjadi dasar pengembangan kebijakan dan praktik pendidikan yang lebih relevan dengan kebutuhan abad ke-21.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan **kajian literatur (literature review)** dengan tujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis berbagai hasil penelitian yang relevan terkait transformasi pembelajaran IPS berbasis *deep learning* dalam mendukung pencapaian Tujuan

Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Kajian literatur dipilih karena memungkinkan peneliti memperoleh pemahaman komprehensif terhadap perkembangan konsep, temuan empiris, serta kesenjangan penelitian pada topik yang dikaji (Creswell & Creswell, 2018; Snyder, 2019).

Jenis kajian literatur yang digunakan adalah **systematic literature review (SLR)** dengan tahapan yang terstruktur, meliputi identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis literatur (Kitchenham & Charters, 2007). Proses pencarian artikel dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah bereputasi seperti **Google Scholar, Scopus, dan Web of Science**, dengan menggunakan kata kunci: "*deep learning in education*", "*social studies learning*", "*IPS learning*", "*sustainable development goals (SDGs)*", dan "*deep learning pedagogy*". Pencarian difokuskan pada artikel yang diterbitkan dalam rentang waktu 2015–2026 untuk memastikan kebaruan dan relevansi kajian.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal bereputasi nasional maupun internasional; (2) penelitian yang membahas *deep learning* dalam konteks pendidikan; (3) penelitian yang relevan dengan pembelajaran IPS atau pendidikan sosial; serta (4) penelitian yang mengaitkan pendidikan dengan SDGs. Sementara itu, kriteria eksklusi mencakup artikel yang tidak melalui proses *peer-review*, tidak tersedia secara penuh (*full text*), atau tidak memiliki relevansi langsung dengan fokus kajian.

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan teknik **analisis tematik (thematic analysis)**, yaitu dengan mengelompokkan temuan-temuan penelitian ke dalam tema-tema utama seperti konsep pembelajaran mendalam, implementasi dalam pembelajaran IPS, integrasi dengan SDGs, serta tantangan dan peluang penerapannya. Analisis ini bertujuan untuk menghasilkan sintesis konseptual yang utuh dan mendalam terhadap topik yang dikaji (Braun & Clarke, 2006).

Untuk menjaga validitas dan reliabilitas kajian, penelitian ini menerapkan prinsip transparansi dalam proses seleksi literatur serta melakukan triangulasi sumber dengan membandingkan berbagai hasil penelitian dari konteks yang berbeda. Selain itu, peneliti juga mengacu pada pedoman pelaporan kajian literatur sistematis seperti **PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)**

untuk memastikan kualitas dan keterlacakan proses penelitian (Page et al., 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan proses systematic literature review (SLR) yang mengacu pada pedoman PRISMA (Page et al., 2021), diperoleh ± 25 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Hasil analisis tematik menghasilkan empat tema utama, yaitu: (1) konsep pembelajaran mendalam, (2) implementasi dalam pembelajaran IPS, (3) kontribusi terhadap SDGs, serta (4) tantangan dan peluang.

No	Penulis & Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Temuan Utama	Relevansi dengan IPS & SDGs
1	Snyder (2019)	Kajian literatur sebagai metodologi	Review	Sintesis literatur sebagai metode ilmiah	Dasar metodologis kajian
2	Ariansyah et al. (2023)	Teknologi & SDGs	Literature review	Teknologi mendukung SDGs	Integrasi IPS & SDGs
3	Prihantini et al. (2025)	Deep learning dalam pendidikan	Review	Meningkatkan kualitas pembelajaran	IPS abad 21
4	Kamaruddin & Saquddin (2024)	Deep learning dalam IPS	Kualitatif	Meningkatkan berpikir kritis	Pembelajaran IPS
5	Fatmawati & Syafiqah (2025)	Implementasi global	Review	Variasi antar negara	Perspektif global
6	Qomah et al. (2026)	Tantangan deep learning	SLR	Kendala guru & infrastruktur	Implementasi IPS
7	Vinuesa et al. (2021)	AI dan SDGs	Konseptual	AI mendukung SDGs	Integrasi teknologi
8	Braun & Clarke (2006)	Analisis tematik	Metodologis	Teknik analisis kualitatif	Analisis data
9	Creswell & Creswell (2018)	Desain penelitian	Metodologis	Pendekatan sistematis	Landasan metode
10	Page et al. (2021)	PRISMA	Panduan	Standar SLR	Validitas penelitian

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa literatur yang dianalisis mencakup tiga kelompok utama, yaitu (1) literatur metodologis, (2) literatur konseptual, dan (3) literatur empiris terkait implementasi deep learning dalam pendidikan. Literatur metodologis

seperti Snyder (2019), Braun dan Clarke (2006), serta Creswell dan Creswell (2018) memberikan landasan teoritis dalam pelaksanaan kajian literatur dan teknik analisis data. Sementara itu, literatur konseptual seperti Vinuesa et al. (2021) menekankan keterkaitan antara teknologi dan pencapaian SDGs.

Di sisi lain, literatur empiris menunjukkan bahwa implementasi deep learning dalam pembelajaran, khususnya IPS, memiliki dampak positif terhadap peningkatan kemampuan berpikir kritis, reflektif, dan kesadaran sosial peserta didik (Kamaruddin & Saquddin, 2024). Selain itu, hasil kajian juga menunjukkan bahwa integrasi teknologi dalam pembelajaran berkontribusi terhadap pencapaian SDGs, terutama pada aspek pendidikan berkualitas (Ariansyah et al., 2023).

Namun demikian, beberapa penelitian juga mengungkap adanya tantangan dalam implementasi, seperti keterbatasan kompetensi guru dan infrastruktur pendidikan (Qomah et al., 2026). Hal ini menunjukkan bahwa transformasi pembelajaran IPS berbasis deep learning masih memerlukan dukungan sistemik, baik dari sisi kebijakan, pelatihan guru, maupun penyediaan sarana pembelajaran.

Secara keseluruhan, tabel ini menegaskan bahwa pembelajaran IPS berbasis deep learning memiliki potensi besar dalam mendukung pencapaian SDGs, namun implementasinya masih memerlukan penguatan pada aspek teknis dan pedagogis.

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa transformasi pembelajaran IPS berbasis deep learning merupakan suatu keniscayaan dalam menjawab tantangan pendidikan abad ke-21 sekaligus mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Pembahasan ini difokuskan pada empat aspek utama, yaitu penguatan konsep, implementasi pedagogis, kontribusi terhadap SDGs, serta analisis kesenjangan (research gap).

1. Penguatan Konsep Deep Learning dalam Pembelajaran IPS

Temuan penelitian menegaskan bahwa deep learning tidak hanya dimaknai sebagai teknologi berbasis kecerdasan buatan, tetapi juga sebagai pendekatan pedagogis yang berorientasi pada pemahaman mendalam, refleksi kritis, dan pembelajaran bermakna. Hal ini sejalan dengan pandangan Snyder (2019) yang menekankan bahwa kajian literatur berperan dalam membangun sintesis pengetahuan yang komprehensif.

Lebih lanjut, Biggs dan Tang (2011) menjelaskan bahwa deep learning dalam konteks pedagogis terjadi ketika peserta didik mampu mengaitkan konsep baru dengan pengetahuan yang telah dimiliki, sehingga terbentuk pemahaman yang bermakna. Dalam pembelajaran IPS, hal ini menjadi sangat penting karena materi IPS bersifat kontekstual dan berkaitan langsung dengan kehidupan sosial. Sejalan dengan itu, penelitian Kamaruddin dan Saqjuddin (2024) menunjukkan bahwa penerapan deep learning dalam IPS mampu meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan reflektif peserta didik terhadap fenomena sosial.

Dengan demikian, penguatan konsep deep learning dalam IPS tidak hanya memperkaya dimensi kognitif, tetapi juga memperkuat dimensi afektif dan sosial peserta didik sebagai warga negara yang bertanggung jawab.

2. Transformasi Implementasi Pembelajaran IPS

Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi deep learning dalam pembelajaran IPS dilakukan melalui model pembelajaran aktif seperti problem-based learning, project-based learning, dan inquiry learning. Pendekatan ini sejalan dengan teori konstruktivisme yang dikemukakan oleh Vygotsky (1978), yang menekankan bahwa pembelajaran terjadi melalui interaksi sosial dan pengalaman langsung.

Penelitian oleh Prihantini et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan pendekatan deep learning yang dipadukan dengan teknologi digital dapat meningkatkan keterlibatan peserta didik serta efektivitas pembelajaran. Selain itu, studi oleh Hmelo-Silver (2004) menegaskan bahwa problem-based learning mampu mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi (higher-order thinking skills) yang sangat dibutuhkan dalam pembelajaran IPS.

Namun demikian, hasil kajian juga menunjukkan bahwa implementasi di lapangan masih menghadapi kendala. Qomah et al. (2026) mengungkapkan bahwa keterbatasan kompetensi guru dalam memahami dan mengintegrasikan deep learning menjadi salah satu hambatan utama. Oleh karena itu, transformasi pembelajaran IPS tidak hanya memerlukan inovasi model pembelajaran, tetapi juga penguatan kapasitas guru sebagai fasilitator pembelajaran.

3. Kontribusi terhadap Pencapaian SDGs

Pembelajaran IPS berbasis deep learning memiliki kontribusi strategis dalam mendukung

pencapaian SDGs, khususnya SDG 4 (Quality Education). UNESCO (2017) menegaskan bahwa pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan (Education for Sustainable Development/ESD) harus mampu membekali peserta didik dengan keterampilan berpikir kritis, pemecahan masalah, dan pengambilan keputusan yang bertanggung jawab.

Sejalan dengan hal tersebut, penelitian Ariansyah et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi teknologi dalam pembelajaran dapat mempercepat pencapaian tujuan SDGs melalui peningkatan kualitas pendidikan. Selain itu, Vinuesa et al. (2021) menegaskan bahwa pemanfaatan teknologi berbasis kecerdasan buatan, termasuk deep learning, memiliki potensi besar dalam mendukung berbagai target SDGs.

Dalam konteks IPS, kontribusi ini terlihat dari kemampuan peserta didik dalam memahami isu-isu global seperti perubahan iklim (SDG 13) dan keadilan sosial (SDG 16). Dengan pendekatan deep learning, peserta didik tidak hanya memahami konsep, tetapi juga mampu menginternalisasi nilai-nilai keberlanjutan dalam kehidupan sehari-hari.

4. Tantangan Implementasi dan Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi pembelajaran IPS berbasis deep learning masih menghadapi berbagai tantangan. Hasil kajian menunjukkan bahwa salah satu kendala utama adalah rendahnya literasi digital guru serta keterbatasan infrastruktur pendidikan (Qomah et al., 2026). Hal ini diperkuat oleh temuan Darling-Hammond et al. (2020) yang menyatakan bahwa keberhasilan inovasi pembelajaran sangat bergantung pada kesiapan guru dan dukungan sistem pendidikan.

Selain itu, terdapat ambiguitas dalam memahami deep learning sebagai pendekatan pedagogis dan sebagai teknologi, yang dapat menimbulkan kesalahan dalam implementasi di lapangan. Menurut Fullan et al. (2018), deep learning dalam pendidikan seharusnya lebih menekankan pada transformasi pengalaman belajar peserta didik, bukan sekadar penggunaan teknologi.

Dari sisi penelitian, masih terdapat kesenjangan yang signifikan. Pertama, penelitian empiris yang menguji efektivitas deep learning dalam pembelajaran IPS masih terbatas, terutama pada konteks pendidikan dasar di Indonesia. Kedua, integrasi antara deep learning, kearifan lokal, dan

nilai-nilai SDGs belum banyak dikaji secara komprehensif. Ketiga, belum tersedia model pembelajaran IPS berbasis deep learning yang kontekstual dan aplikatif.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada pengembangan model pembelajaran yang integratif, berbasis konteks lokal, serta didukung oleh teknologi yang relevan. Selain itu, diperlukan penguatan pelatihan guru dan kebijakan pendidikan yang mendukung implementasi deep learning secara berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, dapat disimpulkan bahwa transformasi pembelajaran IPS berbasis deep learning memiliki peran strategis dalam meningkatkan kualitas pembelajaran sekaligus mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Pendekatan deep learning tidak hanya dimaknai sebagai pemanfaatan teknologi, tetapi juga sebagai paradigma pedagogis yang menekankan pemahaman mendalam, berpikir kritis, reflektif, serta keterkaitan antara materi pembelajaran dengan konteks kehidupan nyata.

Implementasi deep learning dalam pembelajaran IPS terbukti mampu meningkatkan keterampilan abad ke-21, seperti kemampuan berpikir kritis, pemecahan masalah, kolaborasi, dan kesadaran sosial peserta didik. Selain itu, pembelajaran IPS berbasis deep learning berkontribusi signifikan terhadap pencapaian SDGs, khususnya pada aspek pendidikan berkualitas (SDG 4), serta penguatan kesadaran terhadap isu global seperti perubahan iklim dan keadilan sosial.

Namun demikian, implementasi pendekatan ini masih menghadapi berbagai tantangan, antara lain keterbatasan kompetensi guru, rendahnya literasi digital, serta belum optimalnya integrasi antara pendekatan pedagogis dan teknologi dalam pembelajaran. Selain itu, masih terdapat kesenjangan penelitian, terutama terkait kurangnya studi empiris dan belum berkembangnya model pembelajaran IPS berbasis deep learning yang kontekstual dan aplikatif.

Oleh karena itu, diperlukan upaya sistematis untuk mengembangkan model pembelajaran IPS berbasis deep learning yang terintegrasi dengan nilai-nilai SDGs dan kearifan lokal, serta didukung oleh peningkatan kapasitas guru dan kebijakan pendidikan yang adaptif. Dengan demikian,

pembelajaran IPS diharapkan mampu menjadi sarana strategis dalam membentuk generasi yang kritis, berkarakter, dan berkontribusi aktif dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ariansyah, A., Prayogi, S., Kurnia, N., Bilad, M. R., & Sutarto. (2023). Digital technology to support sustainable development goals (SDGs): Literature review. *Lensa: Jurnal Kependidikan Fisika*, 12(2), 85–92.
- Biggs, J., & Tang, C. (2011). *Teaching for quality learning at university* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.
- Budhiarti, Y., Mytra, P., & Slow, L. (2025). The role of deep learning in elementary education: Pedagogical insights from a literature study. *Jurnal Pedagogi dan Inovasi Pendidikan*.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Darling-Hammond, L., Flook, L., Cook-Harvey, C., Barron, B., & Osher, D. (2020). Implications for educational practice of the science of learning and development. *Applied Developmental Science*, 24(2), 97–140.
- Fatmawati, L., & Syafiq, A. N. (2025). Comparison of deep learning implementation in elementary education across countries: A literature review. *Jurnal Pemikiran dan Pengembangan Sekolah Dasar*, 13(1), 45–56.
- Fullan, M., Quinn, J., & McEachen, J. (2018). *Deep learning: Engage the world change the world*. Corwin.
- Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review*, 16(3), 235–266.
- Kamaruddin, K., & Saqjuddin, S. (2024). Deep learning as a transformative approach in social studies education. *International Journal of Management and Education in Human Development*, 4(2), 210–218.
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*. Keele University & Durham University.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021).

- The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
- Prihantini, P., Sutarto, S., Apriliyani, E. S., Stavinibelia, S., Arsyad, M., & Mukhtar, D. (2025). Deep learning approaches in education: A literature review on their role in addressing future challenges. *TOFEDU: The Future of Education Journal*, 4(5), 1213-1220.
- Qomah, A. N. I., Wachidi, W., Maksum, M. N. R., Rifai, A., & Anggraini, F. N. (2026). Deep learning in education: A systematic literature review on its applications and challenges. *Proceedings of International Seminar on Educational Technology (ISETH)*, 1(1), 55-63.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- UNESCO. (2017). *Education for sustainable development goals: Learning objectives*. UNESCO Publishing.
- Vinuesa, R., & Sirmacek, B. (2021). Interpretable deep-learning models to help achieve the sustainable development goals. arXiv.
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Felländer, A., Langhans, S. D., Tegmark, M., & Fuso Nerini, F. (2021). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, 12(1), 233. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>