

СПОСІБ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТІВ РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОННИХ КАРТ ПОЛІВ

Наведено підхід до формування маршрутів руху сільськогосподарської техніки на основі електронних карт полів із використанням програмного забезпечення QGIS та супутникових навігаційних технологій. Запропонований алгоритм охоплює етапи підготовки вихідних даних, перетворення контурів полів у метричну проєкцію, створення прямокутної сітки з кроком, що відповідає робочій ширині агрегату, генерування центрів комірок, присвоєння їм впорядкованих індексів маршруту та побудову безперервної траєкторії проходів машини. Для підвищення придатності маршруту до практичного використання застосовується згладжування геометрії ліній, що зменшує кількість різких поворотів. Сформовані маршрути експортуються у формати, сумісні з ГНСС терміналами та автопілотними системами. Спосіб формування маршрутів базується на відкритому програмному забезпеченні, не потребує спеціалізованих комерційних платформ і може бути інтегроване у виробничі процеси точного землеробства для зменшення перекриттів, оптимізації використання пального та зниження рівня техногенного навантаження на ґрунт. Запропонований підхід може слугувати практичним інструментом для аграрних підприємств і навчальним прикладом для підготовки фахівців із ГНСС технологій в агросекторі.

Ключові слова: електронні карти полів, QGIS, маршрутизація сільськогосподарської техніки, оптимізація руху, точне землеробство.

Вступ. Постановка проблеми

Цифрова трансформація агросектору змінює планування та виконання польових робіт [Mukhamedova et al., 2022; Padhiary et al., 2024]. Точне землеробство спирається на електронні карти полів, ГНСС навігацію (глобальні навігаційні супутникові системи), сенсори стану посівів та інтегровані інформаційні системи, що забезпечують просторово узгоджене управління операціями [QGIS Association, 2025]. Важливою складовою є маршрути руху сільськогосподарської техніки, які гарантують повне покриття поля з мінімальними перекриттями, дотриманням робочої ширини агрегату та раціональними розворотами [Gołab & Pirowski, 2019; Zhang et al., 2024].

У деяких малих господарствах маршрути досі креслять вручну або будують як прості паралельні лінії, що підвищує витрати пального і часу та спричиняє ущільнення ґрунту [Padhiary et al., 2024]. Натомість геоінформаційна маршрутизація на основі електронних контурів поля робить планування прозорим і відтворюваним. Відкриті робочі процеси у QGIS поєднують цифрові моделі рельєфу, землекористування та ґрунтів і підтримують прийняття рішень щодо механізації; емпіричні дослідження фіксують вплив ухилів і роздільної здатності ЦМР (цифрова модель рельєфу) на придатність до механізованих робіт [Mustashkina et al.,

2021; Oymatov et al., 2023; Gołab & Pirowski, 2019]. Паралельно FMIS-платформи (Farm Management Information Systems) інтегрують сенсори, супутникові дані, БПЛА (безпілотні літальні апарати) та телеметрію для наскрізного керування “від поля до звіту”, підкреслюючи значення надійного обміну даними й збереження історії робіт [Mukhamedova et al., 2022].

Великі агрохолдинги використовують спеціалізовані платформи з інтегрованими модулями проєктування маршрутів. Для малих господарств і стартапів доцільні відкриті платформи, передусім QGIS, у поєднанні з електронними картами полів і базовими навігаційними пристроями. Такий підхід дає змогу впроваджувати елементи точного землеробства без значних фінансових витрат. Дослідження [Рижок & Ступень, 2025] демонструє, що поєднання інструментів ШІ з плагінами QGIS (Sentinel Hub, SCP, qgis2web тощо) створює відтворюваний цикл “дані, індекси, класифікація, вебвізуалізація”.

На рівні навігації RTK-DGPS/IMU (Real-Time Kinematic-Differential GPS/Inertial Measurement Unit) забезпечує точне проходження криволінійних траєкторій, а стратегії “preview control” (керування з попереднім оглядом) і адаптивного нечіткого регулювання (з генетичною оптимізацією) зменшують бокове відхилення та підтримують автоматичні розвороти – саме те,

що потрібно для виконання заздалегідь спроектованих маршрутів [Zhou et al., 2013]. У масштабі ландшафту методи виявлення напрямку опрацювання, включно з модифікованим фільтром Габоора, вирівнюють фактичний візерунок проходів із оптимальним варіантом, скорочуючи розвороти, загінки та інші непродуктивні маневри [Donat et al., 2023]. Додатково різні моделі придатності для тракторів, що враховують ухил, доступність доріг і ризики підтоплення з вагами АНР (Analytic Hierarchy Process), дають змогу завчасно узгодити вибір техніки й траєкторій з умовами місцевості [Amongo et al., 2023].

Дослідження послідовно підтверджують ефективність ГНСС навігації та автопілотних систем для оптимізації польових операцій, зокрема точне позиціонування зменшує перекриття, вирівнює норми внесення та покращує ергономіку праці [Padhiary et al., 2024; Phasinam et al., 2025]. Алгоритми “coverage path planning” (паралельні, бустрофедонні, адаптивні тощо) забезпечують повне покриття площі для роботизованих і безпілотних платформ, однак часто реалізуються у “закритих” комерційних модулях [Gołab & Piowski, 2019]. Це підтримує попит на відкриті, гнучкі та відтворювані інструменти на базі загальнодоступного програмного забезпечення [QGIS Association, 2025; Mustashkina et al., 2021; Oymatov & Safayev, 2021; Oymatov et al., 2023].

Отже, потрібен відкритий та економічно доступний спосіб, який у прикладному програмному середовищі перетворює електронні контури полів на маршрути проходів. Запропонований у цій праці спосіб заповнює цю прогалину: він відтворювано формує маршрути в

QGIS на основі електронних контурів полів і параметрів сільськогосподарських агрегатів, забезпечуючи подальшу інтеграцію з навігаційними системами.

Мета

Метою статті є висвітлення способу побудови маршрутів руху сільськогосподарської техніки в середовищі QGIS на основі електронних карт полів, орієнтованої на практичне використання в технологіях точного землеробства для малих господарств.

Спосіб формування маршрутів

Запропонована послідовність операцій у QGIS перетворює електронний контур поля на маршрутну лінію, придатну для навігаційної системи трактора. Вона забезпечує відтворюваність результатів, працює у метричних проєкціях і узгоджує параметри агрегату з геометрією поля, що підвищує точність планування проходів і сумісність із ГНСС навігацією.

Вихідні дані становлять електронні контури полів у векторному форматі CSV (рис. 1), що надходять із GPS-знімання, супутникових джерел або внутрішніх корпоративних систем.

За потреби лінійні межі поля перетворюються на полігон (Lines to Polygons), аби забезпечити коректні геометричні операції. Для точних метричних обчислень контур переводиться у проєкцію з метрами як одиницями виміру; доцільно застосовувати UCS-2000 (EPSG:5561), що унеможливує спотворення довжин під час подальшого опрацювання. На рис. 2 наведено блок-схему способу формування маршрутів у програмному забезпеченні QGIS.



Рис. 1. Фрагмент даних “Електронні контури полів”



Рис. 2. Блок-схема способу формування маршрутів у програмному забезпеченні QGIS

На етапі побудови сітки задається робоча ширина конкретного агрегату (плуг, культиватор, сівалка, обприскувач тощо). Господарство веде довідкову таблицю ширин для наявної техніки, що забезпечує сталість параметрів для різних операцій. У QGIS створюється прямокутна регулярна сітка (Create Grid) з інтервалом, який дорівнює заданій ширині захвату по одній або двох осях, залежно від обраної схеми покриття. Далі сітка обрізається за межами поля (Clip), унаслідок чого зберігаються лише комірки, що повністю або частково лежать у межах полігону. Така сітка слугує геометричною основою для формування смуг проходів.

Для кожної збереженої комірки обчислюється центроїд (Centroids); ці точки зображають геометричні “середини” майбутніх смуг. Надалі формується послідовність відпрацювання смуг за принципом бустрофедону (змійкоподібний порядок, коли сусідні ряди проходяться у протилежних напрямках). Це зменшує кількість розворотів і скорочує холості переміщення.

У таблиці атрибутів центроїдів створюють індекс маршруту `route_order` за формулою, що реалізує бустрофедонну (змійкоподібну) схему (почерговий напрям сусідніх рядів), наприклад:

$$route_order = row_index \times 1000 + \begin{cases} col_index \\ 999 - col_index \end{cases}$$

Під час заповнення таблиці атрибутів значення $(1000 + col_index)$ використовують, якщо `row_index` парний, а значення $(1000 + (999 - col_index))$, коли `row_index` непарний. На практиці спершу визначають індекси рядка і стовпця для кожного центроїда (наприклад, за допомогою координат і кроку сітки), після чого задають змінний напрям:

- для парних рядів порядок іде зліва праворуч;
- для непарних – праворуч ліворуч.

Такий підхід забезпечує єдину відтворювану нумерацію проходів для експорту в навігаційні формати. Далі точки сортуються за `route_order`, перетворюються

на ламану лінію (Points to Path), а за потреби згладжуються або адаптуються під мінімальний радіус розвороту агрегату. Результуюча маршрутна лінія слугує основою для завдання автопілота та оцінювання протяжності робіт, часу виконання і потенційних перекриттів.

Далі формується маршрутна лінія. На основі впорядкованих точок із полем `route_order` застосовується функція “Points to Path”, яка послідовно з’єднує центроїди у єдину безперервну траєкторію відповідно до обраної схеми проходів. У результаті постає лінійний шар маршруту, що відтворює порядок відпрацювання смуг у полі.

Потім траєкторія проходить згладжування і готується до експорту. Щоб зменшити різкі злами та наблизити кривизну до можливостей техніки, використовується *Simplify* та/або *Smooth Geometry* із підібраним допуском і кількістю ітерацій; це формує плавні розвороти й стабільну лінію руху. Готовий маршрутний шар експортується у формати, сумісні з бортовими терміналами та ГНСС приймачами для подальшого завантаження в навігаційні системи тракторів.

Результати

Застосування запропонованого алгоритму до електронних контурів полів демонструє, що система стабільно формує впорядковані маршрути руху техніки. Побудована траєкторія забезпечує повне покриття площі з кроком, який відповідає робочій ширині агрегату; зменшує імовірні зони пропусків і перекриттів порівняно з візуально накресленими лініями; надає однозначне кодування порядку проходів для подальшої інтеграції з навігаційними терміналами; після згладжування геометрії відтворює плавні повороти, узгоджені з реальною кінематикою машини (рис. 3).



Рис. 3. Траєкторія покриття поля з оптимізованими смугами

Спосіб коректно працює на полях простої та помірно складної конфігурації (рис. 4) і залишається придатним для оранки, передпосівного опрацювання,

сівби та обприскування за умови правильного добору кроку сітки відповідно до фактичної ширини захвату конкретного агрегату.

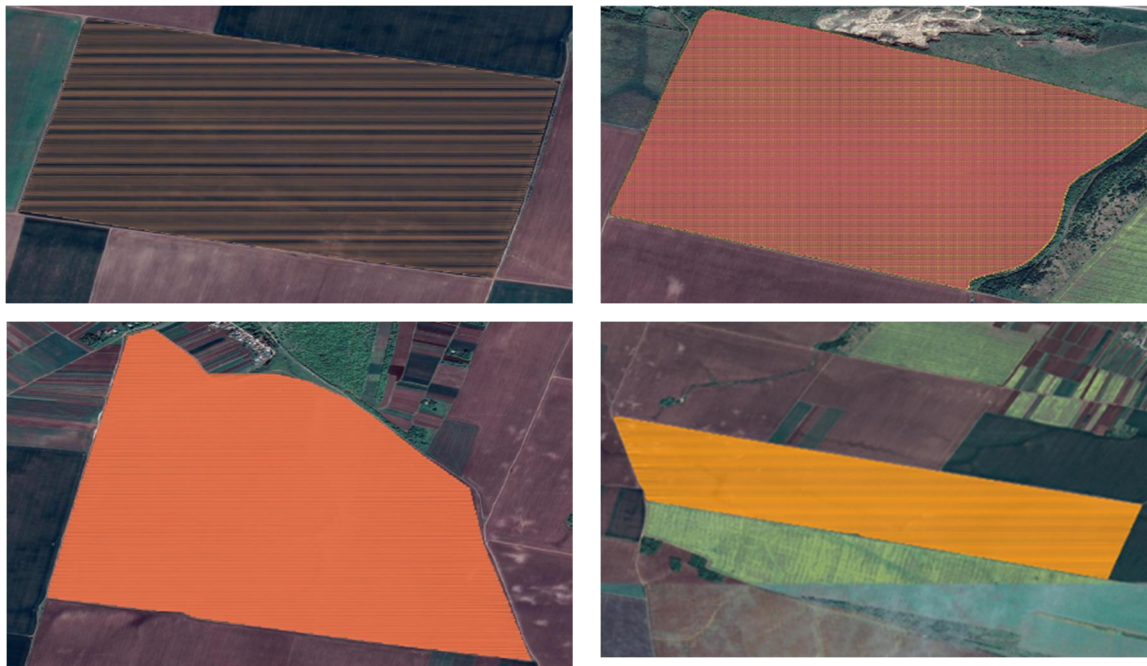


Рис. 4. Різні конфігурації полів з бустрофедонним порядком проходів

Підхід має низку переваг для цифрових технологій точного землеробства. По-перше, використання відкритого програмного забезпечення QGIS забезпечує вільний доступ, розширюваність та інтеграцію з іншими геоінформаційними сервісами, що робить спосіб доступним для різних категорій користувачів. По-друге, алгоритм є прозорим: усі етапи маршрутизації задаються як послідовність ГІС-операцій, які користувач переглядає, відтворює та за потреби модифікує. По-третє, параметри залишаються гнучкими: зміна ширини агрегату, схеми проходів або системи координат не порушує загальної структури рішення. По-четверте, експорт у стандартні формати забезпечує безпосередню інтеграцію з ГНСС навігацією, автопілотом і системами паралельного водіння.

Водночас спосіб має обмеження. Алгоритм спирається на порівняно регулярну структуру проходів і не враховує автоматично складні елементи, зокрема оптимізацію розворотних смуг, об'їзд перешкод, різкі зміни рельєфу та наявність різних технологічних зон у межах одного поля (рис. 5).

Точність маршрутів прямо залежить від якості вихідних електронних карт полів і коректних налаштувань системи координат під час опрацювання. Подальший розвиток передбачає інтеграцію з алгоритмами оптимізації покриття, автоматизоване формування розворотних смуг, урахування технологічних колій та агрофізичних властивостей ґрунтів, а також розроблення спеціалізованих плагінів QGIS для спрощення роботи кінцевого користувача.



Рис. 5. Приклад обмеження способу маршрутизації

Висновки

Описаний спосіб формує маршрути руху сільськогосподарської техніки у QGIS на основі електронних карт полів і призначається для потреб точного землеробства. Такий підхід дає змогу послідовно перетворювати контури полів у полігони в метричній проекції,

створювати регулярну сітку з кроком, що відповідає робочій ширині агрегату, генерувати центроїди комірок, присвоювати їм відповідні індекси, будувати маршрутні лінії та виконувати їхнє згладжування.

Сформовані траєкторії забезпечують раціональне покриття поля, зменшують перекриття та пропуски,

сприяють економії пального й часу та безпосередньо використовуються у GNSS-навігаційних системах техніки. Використання відкритого програмного забезпечення робить рішення доступним для широкого кола агропідприємств і закладів освіти та може бути застосовано для подальшої модернізації цифрових технологій у точному землеробстві.

Література

- Amongo, R. M., Saludes, R., Gallegos, R. K., Relativo, P. L., Duminding, R. S., Pantano, A. D., Cunan, J. J. P., & Lalap-Borja, G. N. (2023). A GIS-based land suitability model for agricultural tractors in CALABARZON Region, Philippines. *Scientific Reports*, 13, 23872. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45071-w>
- Donat, M., Geistert, J., Grahmann, K., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2023). Field path optimization to reduce headland and turning maneuvers at regional scales: Automated detection of cultivation direction in the state of Brandenburg, Germany. *Precision Agriculture*, 24, 2126–2147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10033-9>
- Golaб, J., & Pirowski, T. (2019). An attempt at the automation of the routing of mountain forest roads with the use of GIS spatial analyses. *Geomatics and Environmental Engineering*, 13(4). DOI: <https://doi.org/10.7494/geom.2019.13.4.17>
- Mukhamedova, K. R., Cherepkova, N. P., Korotkov, A. V., Dugasheva, Z. B., & Tvaronavičienė, M. (2022). Digitalisation of agricultural production for precision farming: A case study. *Sustainability*, 14(22), 14802. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214802>
- Mustashkina, D., Khamanov, M., Kalimullin, M., & Karpova, N. (2021). Development of agriculture based on geographic information technologies. *E3S Web of Conferences*, 282, 07019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128207019>
- Oymatov, R., & Safayev, S. (2021). Creation of a complex electronic map of agriculture and agro-geo databases using GIS techniques. *E3S Web of Conferences*, 258, 03020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125803020>
- Oymatov, R., Reymov, M., Narbaev, S., Bakhriyev, M., Maksudov, R., & Salimova, B. (2023). Development of the technological system of creating an electronic map of agriculture using GIS technology. *E3S Web of Conferences*, 386, 04002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338604002>
- Padhiary, M., Saha, D., Kumar, R., Sethi, L. N., & Kumar, A. (2024). Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain vehicle for farm automation. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100483>
- Phasinam, T., Phasinam, K., U-kaew, A., Piyathamrongchai, K., Hatitara, R., Raghavan, V., Nemoto, T., & Sitthichai, A. (2025). Real-time monitoring and positioning of agricultural tractors using a low-cost GPS and IoT device. *International Journal of Geoinformatics*, 21(1), 111–120. DOI: <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i1.3799>
- QGIS Association. (2025). QGIS overview. QGIS.org. November 12, 2025. URL: <https://qgis.org/project/overview/>
- Zhang, S., Liu, H., Cao, X., & Meng, Z. (2024). Agricultural machinery movement trajectory recognition method based on two-stage joint clustering. *Agriculture*, 14, 2294. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14112294>
- Zhou, J., Wang, X., Zhang, R., Feng, Q., Ma, W. (2013). Automatic Navigation Based on Navigation Map of Agricultural Machine. In: Li, D., Chen, Y. (eds) *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI*. CCTA 2012. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 392. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36124-1_37
- Рижок, З., & Ступень, Р. (2025). Застосування методів штучного інтелекту для просторового аналізу сільськогосподарського землекористування у геоінформаційній системі QGIS. *Точне землеробство*, 1 (1), 21–27. DOI: <https://doi.org/10.23939/pa2025.01.021>

A. FEDORCHUK, O. SERANT

Department of geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, E-mail: alina.v.fedorchuk@lpnu.ua

METHOD FOR GENERATING ROUTES OF AGRICULTURAL MACHINERY BASED ON DIGITAL FIELD MAPS

The paper presents an approach to generating routes for agricultural machinery based on digital field maps using QGIS software and satellite navigation technologies. The proposed algorithm includes the following steps: preparing input data, converting field boundaries to a metric projection, creating a rectangular grid with a step equal to the working width of the implement, generating cell centroids, assigning them ordered route indices, and building a continuous trajectory of machine

passes. To improve practical usability, line geometry smoothing reduces the number of sharp turns. The resulting routes are exported to formats compatible with GNSS terminals and autopilot systems. The route-generation method relies on open-source software, does not require specialized commercial platforms, and can be integrated into precision farming workflows to reduce overlaps, optimize fuel use, and lower the technogenic impact on soil. The approach can serve as a practical tool for agricultural enterprises and as a teaching example for training specialists in GNSS technologies in the agricultural sector.

Keywords: digital field maps, QGIS, agricultural machinery routing, movement optimization, precision agriculture.

References

- Amongo, R. M., Saludes, R., Gallegos, R. K., Relativo, P. L., Duminding, R. S., Pantano, A. D., Cunan, J. J. P., & Lalap-Borja, G. N. (2023). A GIS-based land suitability model for agricultural tractors in CALABARZON Region, Philippines. *Scientific Reports*, 13, 23872. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45071-w>
- Donat, M., Geistert, J., Grahmann, K., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2023). Field path optimization to reduce headland and turning maneuvers at regional scales: Automated detection of cultivation direction in the state of Brandenburg, Germany. *Precision Agriculture*, 24, 2126–2147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10033-9>
- Gołab, J., & Pirowski, T. (2019). An attempt at the automation of the routing of mountain forest roads with the use of GIS spatial analyses. *Geomatics and Environmental Engineering*, 13(4). DOI: <https://doi.org/10.7494/geom.2019.13.4.17>
- Mukhamedova, K. R., Cherepkova, N. P., Korotkov, A. V., Dugasheva, Z. B., & Tvaronavičienė, M. (2022). Digitalisation of agricultural production for precision farming: A case study. *Sustainability*, 14(22), 14802. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214802>
- Mustashkina, D., Khamanov, M., Kalimullin, M., & Karpova, N. (2021). Development of agriculture based on geographic information technologies. *E3S Web of Conferences*, 282, 07019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128207019>
- Oymatov, R., & Safayev, S. (2021). Creation of a complex electronic map of agriculture and agro-geo databases using GIS techniques. *E3S Web of Conferences*, 258, 03020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125803020>
- Oymatov, R., Reymov, M., Narbaev, S., Bakhriyev, M., Maksudov, R., & Salimova, B. (2023). Development of the technological system of creating an electronic map of agriculture using GIS technology. *E3S Web of Conferences*, 386, 04002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338604002>
- Padhiary, M., Saha, D., Kumar, R., Sethi, L. N., & Kumar, A. (2024). Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain vehicle for farm automation. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100483>
- Phasinam, T., Phasinam, K., U-kaew, A., Piyathamrongchai, K., Hatitara, R., Raghavan, V., Nemoto, T., & Sitthichai, A. (2025). Real-time monitoring and positioning of agricultural tractors using a low-cost GPS and IoT device. *International Journal of Geoinformatics*, 21(1), 111–120. DOI: <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i1.3799>
- QGIS Association. (2025). QGIS overview. QGIS.org. November 12, 2025. Retrieved from <https://qgis.org/project/overview/>
- Ryzhok, Z., & Stupen, R. (2025). Zastosuvannia metodiv shturnoho intelektu dlia prostorovoho analizu silskohospodarskoho zemlekorystuvannia u heoinformatsiinii systemi QGIS. *Tochne zemlerobstvo*, 1 (1), 21–27. DOI: <https://doi.org/10.23939/pa2025.01.021>
- Zhang, S., Liu, H., Cao, X., & Meng, Z. (2024). Agricultural machinery movement trajectory recognition method based on two-stage joint clustering. *Agriculture*, 14, 2294. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14112294>
- Zhou, J., Wang, X., Zhang, R., Feng, Q., Ma, W. (2013). Automatic Navigation Based on Navigation Map of Agricultural Machine. In: Li, D., Chen, Y. (eds) *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI*. CCTA 2012. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 392. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36124-1_37