

**DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-1-24**

УДК 537.29:631.53

І. І. Сілі, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-6603-2174

О. Ю. Азархов, д.м.н.

ORCID: 0000-0003-2085-4786

Б. В. Єфременко, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-0438-6433

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

e-mail: sili_i_i@pstu.edu, тел.: +380961500078

РОЛЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ У КОМУНІКАЦІЇ РОСЛИН І ЗАПИЛЮВАЧІВ

Анотація. У роботі досліджено роль електричних полів у комунікації між рослинами та їхніми запилювачами, зокрема комахами. Встановлено, що квіткові рослини генерують слабкі електричні поля, які впливають на поведінку запилювачів, таких як бджоли та джмелі. Запилювачі здатні сприймати ці поля за допомогою спеціальних рецепторів, що дозволяє їм ефективніше визначати наявність нектару та пилку. Електричні поля також полегшують процес запам'ятовування оптимальних квіток і сприяють підвищенню точності вибору під час збору ресурсів. Вплив електричних сигналів сприяє підвищенню врожайності та підтриманню біорізноманіття. Результати досліджень підкреслюють важливість електричних полів у складних екологічних взаємодіях між рослинами та їхніми запилювачами, забезпечуючи стабільність природних екосистем.

Ключові слова: квітка, рослина, запилення, комаха, бджола, джміль, нектар, електричне поле, потенціал.

Постановка проблеми. Рослини та запилювачі відіграють ключову роль у функціонуванні екосистем та підтриманні біорізноманіття. Запилення, яке є одним з основних механізмів репродукції рослин, що забезпечує поширення генетичного матеріалу і є критично важливим для відтворення видів. Водночас, ефективність цього процесу часто залежить від взаємодії між рослинами та запилювачами, яка може бути обумовлена різними фізіологічними та хімічними сигналами. Традиційно вивчення комунікації рослин із запилювачами зосереджувалося на вивченні ароматів, кольорів та форми квітів. Однак нещодавні дослідження показують, що електричні поля, які створюються навколо квіткових структур, також можуть відігравати важливу роль у цій взаємодії.

Електричні поля є важливою, але досі недостатньо дослідженою складовою комунікації між рослинами та їхніми запилювачами. У природі кожен організм, включаючи рослини і комах, оточений слабким електричним полем, яке може взаємодіяти з іншими



електричними полями в оточенні. Квіти мають здатність накопичувати електричні заряди, що створює певну різницю потенціалів між ними та запилювачами, такими як бджоли. Бджоли, маючи позитивно заряджене тіло через тертя з повітрям під час польоту, здатні відчувати електричні поля, які генеруються квітами. Це дозволяє їм не лише знаходити джерела нектару, а й визначати, чи була квітка вже відвідана іншим запилювачем, що оптимізує їх поведінку при зборі їжі.

Дослідження електричних взаємодій між рослинами і запилювачами відкриває нові перспективи в розумінні тонкощів цього процесу. Зокрема, існує припущення, що такі взаємодії можуть відігравати ключову роль у підвищенні ефективності запилення в умовах зміни клімату і зменшення чисельності комах-запилювачів. Крім того, дослідження механізмів, через які електричні поля впливають на комунікацію, може сприяти розробці нових технологій у сільському господарстві, спрямованих на оптимізацію процесів запилення та підвищення врожайності.

Аналіз останніх досліджень. Квіти виробляють різноманітні сигнали та для приваблення комах запилювачів. Різноманітність квіткових сигналів охоплює складні відтінки та візерунки кольорів, текстуру пелюсток, ароматичні речовини, локальну вологість повітря та ехолокаційні відбитки. Вплив квіткових сигналів на поведінку запилювачів досліджувався у [1], проте нові квіткові сигнали все ще під питанням. У [2] виявлено, що мультимодальні квіткові сигнали покращують як ефективність збирання їжі запилювачами, так і процес запилення, що сприяє збільшенню кількості насіння та плодів.

Літаючі комахи, включаючи запилювачів, таких як медоносні бджоли, зазвичай мають позитивний електричний потенціал. У той же час квіти часто мають негативний потенціал. Електричні поля, що виникають внаслідок цієї різниці потенціалів між квітами та комахами, сприяють перенесенню та адгезії пилку на коротких відстанях. Більше того, ці поля змінюються залежно від стану запилення квітки, оскільки осідання пилку і відповідне запилення змінюють електричний потенціал квітки.

Проте використання електричних полів запилювачами як інформативних сигналів досі не повністю досліджено. У складному світі взаємодії рослин і запилювачів будь-який сигнал, що підвищує ефективність запилення та збору їжі, має бути взаємовигідним. У статті [3] розглянуто, що джмелі здатні виявляти і навчатися використовувати квіткові електричні поля та їх структурні варіації для оцінки винагороди та розрізнення квітів.

Електростатика займається електричними силами, між електронами та іонами, а також пов'язаними з ними електричними



полями та потенціалами. Під час електростатичного заряджання електрони залишаються відносно нерухомими, розподіляючись по поверхні об'єкта та концентруючись на гострих краях. Об'єкт стає електростатично зарядженим або внаслідок додавання до нього електронів, що робить його «негативно» зарядженим, або внаслідок видалення електронів, що робить його «позитивно» зарядженим. Заряди одного знаку відштовхуються, а протилежних знаків притягуються. Електростатична сила між двома зарядженими тілами (F) описується рівнянням (1) Кулона [4]:

$$F = k_e \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (1)$$

де: F — це сила взаємодії між зарядами,

k_e — електростатична стала (близько $8,99 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$),

q_1, q_2 — значення зарядів двох тіл,

r — відстань між центрами заряджених тіл.

Електростатичні взаємодії відіграють важливу роль у різних біологічних процесах, включаючи запилення рослин як у природі, так і в сільському господарстві [5].

Зазвичай рослини мають невеликі негативні поверхневі заряди за умов ясної погоди, тому вони оточені електричними полями низької інтенсивності [6]. За нестабільних погодних умов, таких як хмарний або дощовий день, електричні поля можуть змінювати свою полярність, і поверхневі заряди стають позитивними [7]. Величина електричних полів частково залежить від хімічного складу рослини, її висоти та навколишнього середовища [8]. Розподіл електричного поля навколо рослини варіюється залежно від її форми, і електричні поля рослини мають бути найсильнішими біля гострих точок (рис.1), таких як кінчики рослин, включаючи квітки [1].

Бджоли, що збирають нектар, зазвичай мають електрично позитивні поверхневі заряди [9]. Коли бджола летить у повітрі, вона стикається з потоком зарядженого повітря, і її тіло заряджається електростатичною фрікційною електрикою [10]. У [11] припустили, що у випадку комах, які збирають пилок, накопичення пилку на поверхнях комах та його розповсюдження покращуються завдяки силам притягання між позитивно зарядженою поверхнею тіла комахи та загалом негативно зарядженою рослиною з її пилком.

Stanley та Linskens у [12] припустили, що хоча немає доказів на підтримку думки про те, що електропотенціальні градієнти між пилком, який переноситься комахами, і приймочками квітів беруть участь у запиленні, можливо, що на транспортування пилку на великі

відстані до квіток впливають електричні взаємодії. Декілька дослідників у різних галузях вивчення запилення повідомляли про можливу участь електростатики в природних механізмах запилення.

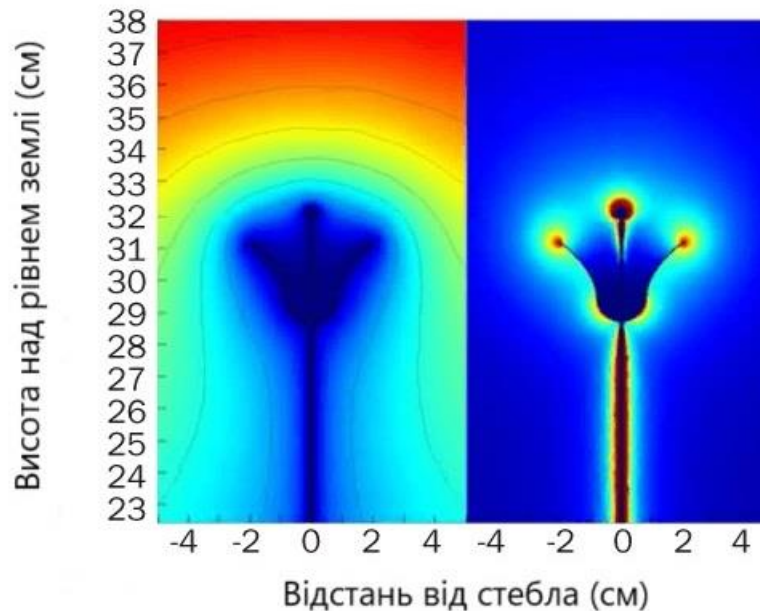


Рис. 1. Розподіл напруженості електричного поля квітки у навколишньому просторі (В/м)

Згодом було висунуто припущення, що пилкові зерна, рухаючись у повітрі, набувають сильного позитивного заряду і таким чином електростатично притягуються до негативно заряджених квіток, зосереджених на кінчиках рослин, яких вони досягають [1]. Таким чином, разом із повітряним потоком, електростатичне притягання могло б утворити ефективний механізм для захоплення пилку анемофільними рослинами [4]. Однак більшість повідомлень про можливу участь статичної електрики в запиленні вітром є спекулятивними, оскільки дуже важко відрізнити аеродинамічні та електростатичні сили, що впливають на напрямок руху пилкових зерен до приймочки.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою наукової статті є проведення комплексного аналізу останніх досліджень, присвячених ролі електричних полів у комунікації між рослинами і запилювачами. Публікація має на меті узагальнити сучасні знання про механізми взаємодії електричних полів рослин і комах-запилювачів та виявити ключові закономірності, що визначають вплив електричних полів на поведінку запилювачів під час пошуку їжі.

Основна частина. Електричні взаємодії між бджолою і квіткою виникають через заряд, який несе бджола, та потенціал квітки

стосовно атмосферного електричного поля. Щоб кількісно визначити заряд бджоли, окремих робочих бджіл тренували залітати в клітку Фарадея, яке містило нагороду у вигляді сахарози [2]. Загальний заряд q , який несе бджола, вимірювався за допомогою індукованої напруги на відкаліброваному конденсаторі. Під час вимірювань, проведених на 51 особині, було виявлено, що 94% бджіл мали позитивний заряд, а 6% — негативний ($q_{mean} = 32 \pm 5$ pC). Ці результати підтвердили попередні вимірювання на медоносній бджолі *Apis mellifera* [2] і встановили, що більшість бджіл, які літають в навколишньому середовищі, мають позитивний заряд (рис.2), який при певних умовах може бути переданий іншим об'єктам.

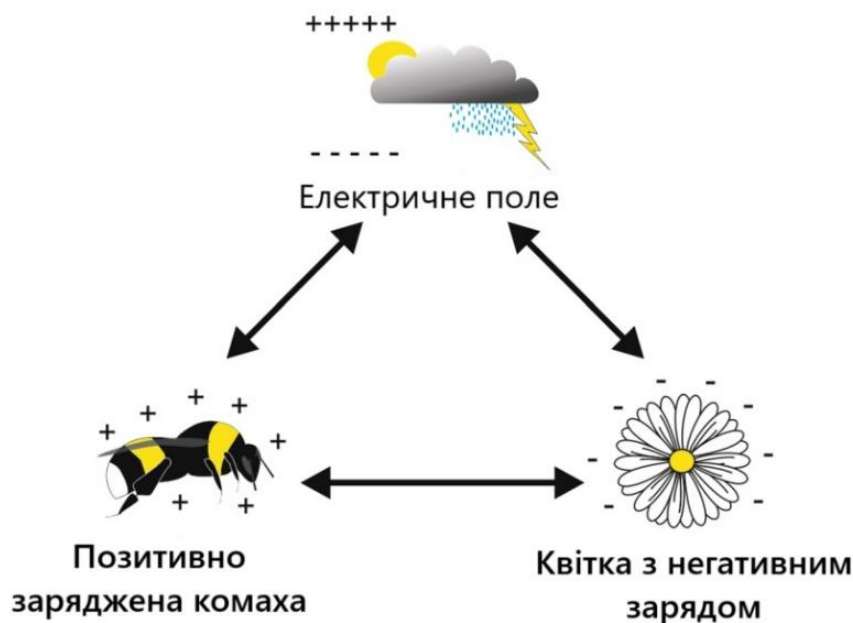


Рис. 2. Принцип заряджання комахи-запилювача та квітки у навколишньому природному електричному полі.

Електричну взаємодію між бджолою і квіткою досліджували далі, розмістивши квіти в навколишньому середовищі з вільно літаючими бджолами, що збирали нектар. Електричний потенціал у стеблах рослини був записаний для оцінки електричного сигналу, створеного під час наближення та приземлення окремої зарядженої бджоли. Передача заряду квітці призводила до позитивної зміни електричного потенціалу, зафіксованого в стеблі.

Приземлення 50 особин призвело до середньої зміни потенціалу, яка тривала приблизно 30 секунд і досягала піку близько 8 ± 1 мВ (рис. 3). Така зміна перевищує природні коливання у разі відсутності бджіл і триває довше, ніж перебування бджоли на квітці. Зміна потенціалу часто починається ще до контакту з бджолою, на рис. 3 це координата ~ 11 сек, яка свідчить про те, що це не просто варіація

потенціалу, а пряма електростатична індукція між зарядженою бджолою і заземленою квіткою, як припускалося у [7].

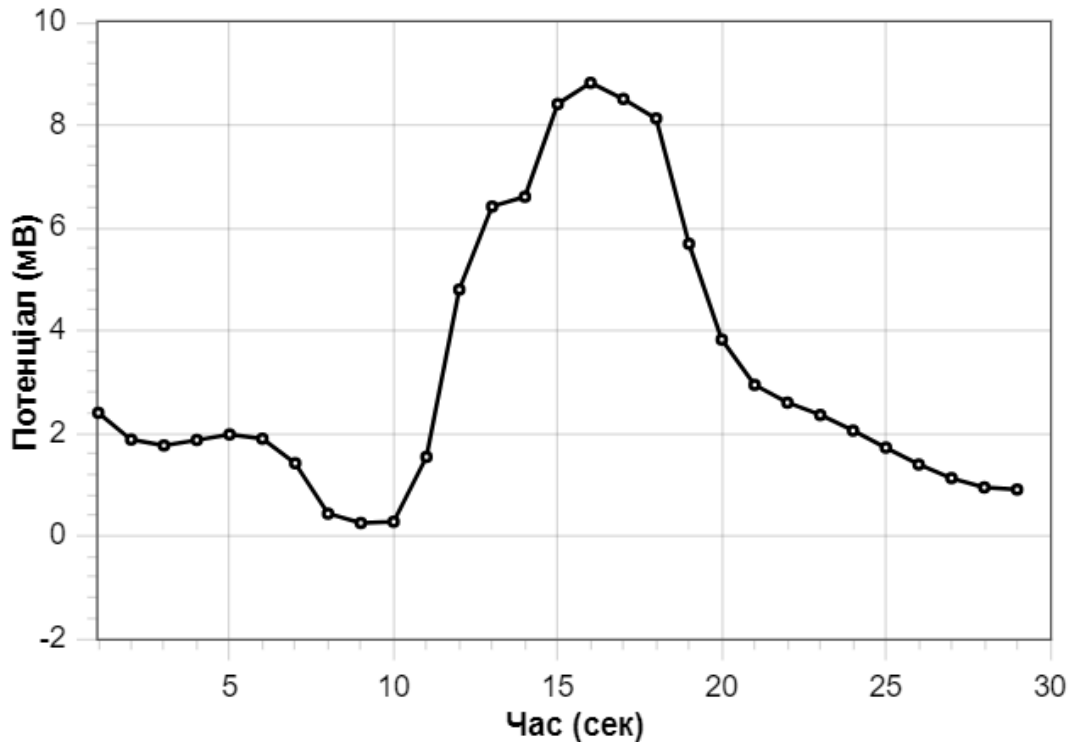


Рис. 3. Зміна потенціалу квітки (мВ) при наближенні позитивно зарядженої комахи-запилювача.

Оскільки електричний потенціал квітки безпосередньо впливає на запилення та відвідування бджіл, він потенційно містить інформацію для інших запилювачів щодо квіткових ресурсів. Відвідувачі-запилювачі впливають на квіткові сигнали безпосередньо, залишаючи сліди (запахи) на поверхні пелюсток або ініціюючи зміни в інших квіткових сигналах, таких як колір, форма та вологість. Такі зміни зазвичай відбуваються протягом хвилин або годин. Зміна ж потенціалу, спричинена відвідуванням бджоли, відбувається в межах секунд.

Щоб електричне поле квітки могло діяти як сигнал, запилювачі повинні мати можливість виявляти його та відрізнити від загального навколишнього фону. У роботі [3] використали спеціальне навчання, щоб перевірити здатність бджіл розрізняти штучні квіти з різними електричними полями. Штучні квіти склалися з сталевого диска діаметром 35 мм і товщиною 1,5 мм, декорованого фіолетовим епоксидним шаром.

Половина таких квітів була підтримана при звичній біологічно постійній напрузі 30В. Ця напруга була обрана як середнє значення для електричного поля ізольованої квітки висотою 30 см у нормальному атмосферному електричному полі з градієнтом 100 В/м.

Заряджені квіти пропонували запилювачам нагороду у вигляді сахарози, тоді як інші ідентичні квіти були заземлені і мали нейтральний потенціал (0В).

Штучні квіти не відрізнялися в жодному іншому відношенні. Протягом 50 відвідувань бджіл було зафіксовано збільшення відносної кількості відвідувань нагороджувальних заряджених квітів (Рис. 4). Під час останніх 10-ти відвідувань штучні квіти з зарядом у 30В досягли точності $71 \pm 2\%$. Обидва типи квіток були потім заземлені, і тест на вибір продовжено [3].

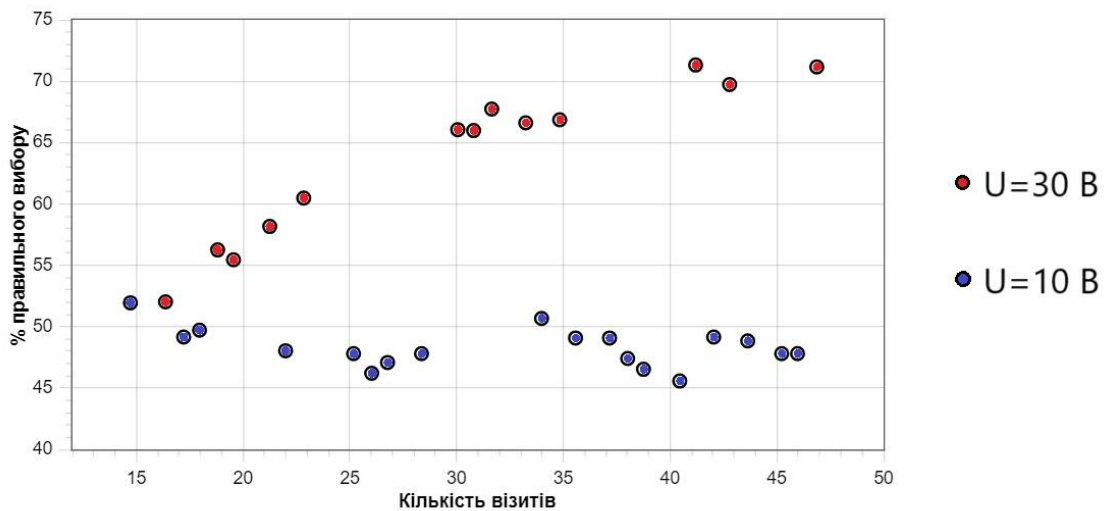


Рис. 4. Відсоток правильного вибору запилювачів нагороджувальних квітів при наведеному потенціалі квітки $U=30$ В (червоний колір) та $U=10$ В (синій колір)

Квіткові сигнали різноманітні і відповідають мультимодальному сприйняттю запилювачів. Взаємодіючи, квіткові сигнали підвищують ефективність збору їжі. Сигнали кольору залежать від відтінку, від контрасту між відтінками та від їх геометричних візерунків. Нектарні направляючі є такими візерунками, надаючи інформацію, що приваблює запилювачів і полегшує їх зусилля при зборі їжі. Подібним чином, геометрія квіткових електричних полів може містити додаткову інформацію, важливу для запилювачів.

Квіткові сигнали можуть працювати як індивідуально, так і в доповнюючому режимі. Коли сигнали подані разом, мультимодальні сигнали підвищують точність сенсорної інформації, яку використовують медоносні бджоли. Зокрема, асоціація кольору з ольфакторними квітковими сигналами зменшує сприйняття невизначеності, пов'язаної з окремим квітковим сигналом, і збільшує здатність бджіл розрізняти винагороджувальні стимули [8].

Результати дослідження [3] показують, що електричне поле є одним з сигналами для комах запилювачів. Додаючи до різноманітного



квіткового відображення, орієнтованого на органи чуття запилювачів, електричні поля покращують як швидкість, так і точність, з якою бджоли навчаються та розрізняють винагороджувальні квіти. Таким чином, чутливість до електричних полів є потенційно важливою сенсорною модальністю, яку слід розглядати поряд з зором і нюхом. Універсальність електричних полів у природі та їх інтеграція в сенсорну екологію бджіл свідчать про те, що електричні поля відіграють досі недооцінену роль у взаємодіях між рослинами та комахами. Це дослідження піднімає можливість зворотного інформаційного обміну між рослинами та запилювачами в часових масштабах від мілісекунд до секунд, що значно швидше, ніж раніше описані зміни в квіткових запахах, кольорі чи вологості.

В іншому дослідженні [13] доведено, що джмелі, *Bombus terrestris* і медоносні бджоли, *Apis mellifera*, здатні виявляти слабкі електричні поля, кожен у різних поведінкових контекстах, використовуючи різні сенсорні механізми. Джмелі можуть відчувати присутність слабких електричних полів, що оточують квіти, і розрізняти електрополя з різною радіальною геометрією [13]. Сенсорна основа для виявлення електрополя у джмелів, схоже, залежить від механосенсорних волосків, які механічно відхиляються під впливом прикладеного електричного стимулу. Механічне відхилення цих волосків, у свою чергу, викликає нервові реакції, передаючи інформацію до центральної нервової системи комах. Використовуючи лазерну доплерівську віброметрію відхилення серії спинних волосків у відповідь на прикладені електричні поля показує колективну чутливість [13].

Джмелі також можуть використовувати електричну інформацію для розрізнення квітів [7]. Вони також можуть швидше навчатися розрізненню кольорів, коли кольорові підказки поєднуються з електричними полями, подібними за величиною до тих, що оточують природні квіти. По суті, джмелі навчалися не так охоче в електрично нейтральному середовищі.

Сенсорна основа електрорецепції у медоносних бджіл, за гіпотезою, полягає в антенах, які електромеханічно пов'язані з навколишнім електричним полем завдяки тому, що бджоли електрично заряджені і, таким чином, піддаються дії електростатичних сил. Трансдукція цих сил, як передбачається, відбувається в органі Джонстона, розташованому в антенах. Greggers та ін. [13] продемонстрували, що антени медоносних бджіл коливаються під дією електричних стимулів, і це збудження може викликати активність в антенному нерві. Також було показано, що бджоли з видаленими або зафіксованими антенами менш здатні асоціювати харчову винагороду з електричними стимулом у класичній



парадигмі умовного рефлексу. Під час дослідження сенсорної основи електрорецепції у джмелів було виявлено, що електромеханічна чутливість (тобто швидкість і кутове зміщення у відповідь на електричні стимули) волосків джмелів значно вища, ніж у їхніх антен. Чутливість цих волосків до різноманітних стимулів була зареєстрована у порівнянні з антенами тих самих джмелів. Було показано, що волоски рухаються з приблизно на порядок більшою швидкістю та на 3–4 порядки більшим кутовим зміщенням, ніж антени, у широкому діапазоні частот. Пікова реакція волосків зазвичай спостерігалася на частотах стимулу між 2 і 4 кГц, що узгоджується з їх малою масою та високою жорсткістю. Мінімальне електричне поле, необхідне для викликання вимірюваних відхилень волосків, становило від 0,77 до 61 В/м залежно від частоти стимулу. Антени потребували більших мінімальних значень поля від 15,3 до 306 В/м. Позаклітинні записи від основи волосків у 15 окремих джмелів показали збільшення нервової активності у відповідь на електричні стимули навіть при низьких частотах (<1 Гц) [13].

Висновки. Проведений аналіз підтверджує гіпотезу про те, що електричні поля відіграють важливу роль у процесі взаємодії між рослинами та їхніми запилювачами. Рослини створюють слабкі негативні електричні поля навколо своїх квіток, і ці поля можуть бути сприйняті запилювачами, такими як бджоли, комахи та інші. Завдяки цим полям, запилювачі здатні швидше і точніше визначати стан нектару та кількість пилку, що впливає на їхню поведінку і вибір. Електричні сигнали допомагають комахам краще розрізняти квітки та запам'ятовувати ті, які містять більше ресурсів для живлення. Таким чином, електричні поля сприяють підвищенню ефективності процесу запилення та оптимізації взаємодії між рослинами та запилювачами.

Враховуючи все вищезазначене, можна стверджувати, що електричні поля є невід'ємною складовою системи комунікації між рослинами та запилювачами, що сприяє більш ефективному і точному процесу запилення, підвищуючи врожайність і сприяючи біорізноманіттю в природних екосистемах.

Список використаних джерел

1. Clarke D., Morley E., Robert D. The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial electroreception. *J Comp Physiol*. 2017. Vol. 203. P. 737–748. <https://doi.org/10.1007/s00359-017-1176-6>.
2. Clarke D., Whitney H., Sutton G., Robert D. Detection and learning of floral electric fields by bumblebees. *Science (New York, N.Y.)*. 2013. Vol. 340(6128). P. 66-69. <https://doi.org/10.1126/science.1230883>.



3. Dominic Clarke. Detection and Learning of Floral Electric Fields by Bumblebees. *Science*. 2013. Vol. 340. P. 66-69. <https://doi.org/10.1126/science.1230883>.
4. Eckardt H. The resonant Coulomb and Ampere-Maxwell law. *UFT paper*. 2020. P. 440.
5. Sutton Gregory P., Clarke Dominic, Morley Erica L., Robert Daniel. Mechanosensory hairs in bumblebees (*Bombus terrestris*) detect weak electric fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 113, Is. 26. P.7261–7265. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601624113>.
6. Whitney H. M. Floral iridescence, produced by diffractive optics, acts as a cue for animal pollinators. *Science*. 2019. Vol. 323. P. 130.
7. Vaknin Y., Gan-Mor S., Bechar A., Ronen B., Eisikowitch D. The role of electrostatic forces in pollination. *Plant Syst. Evol*. 2020. Vol. 222. P. 133.
8. Bowker G. E., Crenshaw H. C., Electrostatic forces in wind-pollination. Part 1: Measurement of the electrostatic charge on pollen. *Atmos. Environ*. 2017. Vol. 41. P. 1587. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.048>.
9. Leonard A. S., Papaj D. R., 'X' marks the spot: The possible benefits of nectar guides to bees and plants. *Funct. Ecol*. 2011. Vol. 25. P. 1293. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01885.x>.
10. Spikes, Hugh A. Triboelectrochemistry: Influence of applied electrical potentials on friction and wear of lubricated contacts. *Tribology Letters*. 2020. Vol. 68. P. 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01328-3>.
11. Sahil Lalljith, Ismail Fleming, Umeshan Pillay, Kiveshen Naicker, Zachary Jose Naidoo, Akshay Kumar Saha. Applications of flower pollination algorithm in electrical power systems: a review. *IEEE Access* 2021. Vol. 10. P. 8924-8947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138518>.
12. Stanley R. G., Linskens H. F. Pollen: Biology, biochemistry, management. Heidelberg, Germany: *Springer Verlag*. 2016.
13. Benjamin H. Paffhausen, Julian Petrasch, Uwe Greggers, Aron Duer et. all The electronic bee spy: eavesdropping on honeybee communication via electrostatic field recordings. *Frontiers in Behavioral Neuroscienc*. 2021. T. 15. P. 647224. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.647224>.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2024 р.



I. Sili, O. Azarkhov, B. Yefremenko
Pryazovskyi State Technical University

THE ROLE OF ELECTRIC FIELDS IN PLANT-POLLINATOR COMMUNICATION

Summary

Plants and pollinators play a key role in the functioning of ecosystems and maintaining biodiversity. Pollination, which is one of the primary mechanisms of plant reproduction, ensures the spread of genetic material and is critical for species reproduction. At the same time, the effectiveness of this process often depends on the interaction between plants and pollinators, which can be influenced by various physiological and chemical signals. Traditionally, the study of plant-pollinator communication has focused on examining scents, colors, and flower shapes. However, recent research shows that electric fields created around floral structures may also play an important role in this interaction.

Electric fields are an important yet still under-researched component of communication between plants and their pollinators. In nature, every organism, including plants and insects, is surrounded by a weak electric field that can interact with other electric fields in the environment. Flowers have the ability to accumulate electric charges, creating a potential difference between them and pollinators such as bees. Bees, having positively charged bodies due to friction with the air during flight, can sense the electric fields generated by flowers. This ability allows them not only to locate nectar sources but also to determine whether a flower has already been visited by another pollinator, optimizing their foraging behavior.

Flying insects, including pollinators such as honeybees, usually have a positive electric potential. At the same time, flowers often have a negative potential. The electric fields generated due to this potential difference between flowers and insects contribute to the transfer and adhesion of pollen over short distances. Moreover, these fields change depending on the state of the flower's pollination, as pollen deposition and subsequent pollination alter the electric potential of the flower.

Electric interactions between a bee and a flower occur due to the charge carried by the bee and the flower's potential relative to the atmospheric electric field. To quantitatively determine the charge of a bee, individual worker bees were trained to enter a Faraday cage, which contained a reward in the form of sucrose. The total charge carried by the bee was measured using the induced voltage on a calibrated capacitor.

The results of the study show that the electric field is one of the signals for pollinating insects. In addition to the diverse floral displays oriented toward the sensory organs of pollinators, electric fields enhance both the speed and accuracy with which bees learn and distinguish rewarding flowers.

Key words: flower, plant, pollination, insect, bee, bumblebee, nectar, electric field, potential.