

**НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕТАБОЛИТЫ, ЭТИЛЕН И АКТИНОВЫЙ
ЦИТОСКЕЛЕТ ВОВЛЕЧЕНЫ В РЕГУЛЯЦИЮ ГРАВИТРОПИЧЕСКОГО ОТВЕТА
КОРНЕЙ *Arabidopsis thaliana***

**Г.А. Пожванов¹, Н.С. Клименко^{1,2}, А.Е. Гобова¹, С. Альсик³, А. Ферни³, А.Л. Шаварда^{4,5},
К. Виссенберг⁶, С.С. Медведь¹**

¹Санкт-Петербургский государственный университет, биологический факультет, Санкт-Петербург, Россия. 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

²Всероссийский институт генетических ресурсов имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия. 190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44

³Институт Макса Планка молекулярной физиологии растений, Потсдам, Германия 14476, Германия, г. Потсдам, Научный парк Потсдам-Гольм, ул. Ам Мюлленберг, д. 1

⁴Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, Научный парк, РЦ РМКТ, Санкт-Петербург, Россия. 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

⁶Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия. 2020, Бельгия, г. Антверпен, ул.

Груненборгерлаан, д. 171

g.pozhvanov@spbu.ru

Гравитропизм растений – направленный рост органов по отношению к вектору силы тяжести – позволяет им оптимальным образом организовать своё тело даже в отсутствие действия других поляризованных факторов среды. Направление роста корня сопоставлено вектору гравитации, для побегов же характерен отрицательный гравитропизм – рост против вектора силы тяжести. При отклонении осевого органа растения от вертикального положения гравитропическая реакция корректирует направление роста, ускоряя рост на нижней стороне побега и тормозя рост на нижней стороне корня. Показано, в частности, что в регуляции гравитропической реакции участвуют полярный транспорт фитогормона ауксина, цитоскелет, транспорт ионов Ca^{2+} , H^+ , K^+ , Rho ГТФазы, а также другие фитогормоны. Показано, что фитогормон этилен замедляет растяжение клеток корней и, таким образом, может участвовать в регуляции гравитропической реакции. У стеблей под действием этилена наблюдается т.н. “тройной ответ”: торможение роста стебля в длину, его утолщение и смена направления роста на 90° – с вертикального на горизонтальное. Однако реальный механизм регуляции этиленом гравитропической реакции растений пока ещё остаётся загадкой.

Целью настоящей работы было выявление изменений профиля низкомолекулярных метаболитов и характера реорганизации актинового цитоскелета под действием этилена в ходе гравитропической реакции корней проростков *Arabidopsis thaliana*. Для достижения поставленной цели изучали влияние этиленпродуцента этефона, салициловой кислоты и ингибитора синтеза этилена аминоксидовинилилглицина (АВГ) на организацию актинового цитоскелета и состав низкомолекулярных метаболитов у 7-суточных проростков арабидопсиса в условиях их вертикального роста и при гравистимуляции.

Гравистимуляцию растений арабидопсиса осуществляли путём поворота чашек Петри с растениями в вертикальной плоскости на 90° относительно вектора силы тяжести. Актиновый цитоскелет визуализировали методом конфокальной микроскопии с использованием трансгенных растений *GFP-fABD2*, конститутивно экспрессирующих GFP, слитый с С-терминальным доменом актин-связывающего белка фимбрина. Состав низкомолекулярных метаболитов изучали посредством метаболомного анализа с использованием газовой хроматографии – масс-спектрометрии триметилсилильных производных метаболитов. Обработку данных метаболитных профилей проводили методом главных компонент с помощью пакета прикладных программ MATLAB R2014a

При гравистимуляции корня в отсутствие дополнительных обработок спектр ориентации актиновых микрофиламентов в зоне растяжения расширяется за счёт роста доли

тяжей актина, ориентированных поперечно к оси органа (сонаправленных вектору силы тяжести). Обработка этифоном (10 мкМ) вызывает разборку актиновых микрофиламентов и значительное расширение спектра их ориентации в течение 30–60 мин. Ингибитор синтеза этилена АВГ (10 мкМ) снимал эффект перестройки актина при переориентации растений в поле силы тяжести, а салицилат вызывал нарушение реорганизации актина.

Выявлено, что в течение 60 мин гравистимуляции в апексах корней арабидопсиса (корневой чехлик, апикальная меристема и зона растяжения) развиваются метаболические перестройки, при которых уровень сахаров уменьшался в 2 раза (глюкоза, фруктоза, манноза, арабиноза), а уровень ряда аминокислот увеличивался (валин, лейцин, серин, γ -аминомасляная кислота). Изменения метаболического профиля при гравистимуляции были более выраженными в кончиках корней (ось главной компоненты 1 (ГК 1) объясняла 87% дисперсии), чем в целых проростках арабидопсиса (76% дисперсии). Примечательно, что обработка АВГ и салицилатом не приводила к значимым изменениям метаболических профилей как в масштабе целого проростка, так и в кончиках корней арабидопсиса, выращенных вертикально. Однако при гравистимуляции обработка АВГ приводила к разделению метаболических профилей кончиков корней вдоль оси ГК 1, причём содержание моносахаридов возрастало, а уровень аминокислот валина и серина уменьшался. Таким образом, действие ингибитора синтеза этилена АВГ приводило к инверсии характера метаболической перестройки при гравистимуляции. Более того, под действием АВГ скорость роста корня достоверно увеличивалась на 42% при вертикальном росте и на 14% при гравистимуляции. Возможно, низкомолекулярные метаболиты, в особенности осмотически активные сахара, вовлечены в регуляцию гравитропической реакции корня как путём регуляции тургорного давления, так и изменения состава клеточной стенки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в регуляции гравитропизма корней *Arabidopsis thaliana* фитогормон этилен одновременно влияет и на реорганизацию актинового цитоскелета, и на метаболические профили в апексе корня, что, вероятно, изменяет тургор клеток в зоне растяжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №№ 14-04-01624а, 17-04-00862а и СПбГУ №№ 1.38.233.2014, 1.23.1975.2015, 1.23.1142.2016.