

БІОФОРТИФІКАЦІЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИН

О. М. БУРЛАКА, Б. В. СОРОЧИНСЬКИЙ

Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України, Київ

E-mail:burlaka29@gmail.com

Обговорюється проблема біофортificaції, яка передбачає поліпшення методами біотехнології поживних властивостей сортів сільськогосподарських рослин. Розглянуто питання харчового дефіциту деяких мінералів та вітамінів і негативних наслідків цього для здоров'я населення, які можна зменшити, створюючи та використовуючи рослинні продукти з покращеними властивостями. Описано напрями та досягнення підвищення харчової цінності рослин із застосуванням методів генетичної інженерії.

Ключові слова: біофортificaція, дефіцит мікронутрієнтів, генетична інженерія, поліпшення властивостей рослин.

Термін «біофортificaція» означає поліпшення поживних якостей рослин шляхом використання прийомів традиційної селекції або ж завдяки генно-інженерним підходам. Суть біофортificaції — у зміні властивостей самої рослини, і саме в цьому її відмінність від фортificaції харчової продукції, яка передбачає цілеспрямоване внесення додаткових мікронутрієнтів та вітамінів у харчові продукти з метою поліпшення їхньої поживної цінності. Кінцевою метою стратегії біофортificaції є створення рослин з підвищеним рівнем вмісту певних елементів та сполук — як таких, що поглинаються з ґрунту (макро- та мікроелементи), так і тих, що синтезуються в рослині (вітаміни, вторинні метаболіти). Завдяки сучасним генно-інженерним технологіям, реальними стали також синтез та накопичення у певних частинах рослини не властивих їй сполук (наприклад, збагачення бета-каротином ендосперму золотого рису) з метою надання окремим культурам нових поліпшених властивостей для забезпечення поживної цінності харчового раціону.

Проблема якісного та збалансованого харчування є глобальною. Вкрай актуальна вона також і для України. За даними ВООЗ, причиною 0,8 млн. смертей на рік (1,5% від загальної кількості) є дефіцит заліза і такої самої кількості — дефіцит вітаміну А [1]. Загалом, близько 25% населення світу (майже 1,6 млрд. людей) страждають від анемії різного походження [2], половина цих випадків спричинена дефіцитом заліза. Окрім цього припускають існування ще близько

1 млрд. випадків дефіциту заліза без анемії [3]. 254 млн. дітей дошкільного віку в світі мають дефіцит вітаміну А, у 3 млн. з них спостерігаються видимі зміни зорового апарату внаслідок цього дефіциту, а 250–500 тис. дітей сліпнуть щороку через дефіцит вітаміну А, половина з них помирає протягом місяця після цього [4]. Близько 2 млрд. людей (30% усього населення), за оцінками ВООЗ, споживають недостатньо йоду і перебувають під загрозою йододефіцитних порушень [5]. Масштаби та вплив дефіциту інших мікронутрієнтів набагато складніше оцінити, однак цілком очевидно, що деякі їх форми, включаючи дефіцит цинку, вітаміну В₉, є дуже поширеними. Так, 20% населення світу мають дефіцит цинку [6], а ризик його недостатнього споживання існує для 49% [7]. Глобальні масштаби дефіциту фолієвої кислоти (вітаміну В₉) не визначено, але він часто виникає в популяціях з високим рівнем споживання очищених злаків та одноманітним складом раціону [8]. Дефіцит цього вітаміну призводить до виникнення дефектів невральної трубки та інших порушень розвитку і є причиною 300 тис. смертей новонароджених щороку [9], а також серцево-судинних, онкологічних захворювань, порушень розумових функцій тощо. Дефіцит вітамінів групи В часто буває в сукупності, оскільки джерелом різних вітамінів цієї групи є однакові продукти, а очищення, перемелення та видалення зародків у зернових злаків усуває більшість тіаміну (В₁), рибофлавіну (В₂) та ніацину (В₃), вітамін В₉,

залізо та цинк. Дефіцит вітаміну С, окрім інших порушень, спричиняє також і послаблення засвоєння заліза, що провокує дефіцит останнього [6]. Ендемічний дефіцит селену виникає в регіонах зі знизеним його вмістом у ґрунті; рослини, вирощені на таких ґрунтах, і, відповідно, корми та продукти з них містять недостатньо селену [10, 11].

У багатьох країнах звичними є множинні дефіцити за сукупностями мікронутрієнтів, коли значна частина населення через обмежені матеріальні ресурси не може забезпечити набір продуктів з високою біологічною цінністю. Динамічні спостереження за станом фактичного харчування в Україні свідчать, що понад 50% населення України харчується неякісно [12]. Так, відповідно до оцінок ВООЗ, близько 9% невагітних та 27% вагітних жінок, 22% дітей дошкільного віку в Україні мають анемію, у виникненні якої одним із найбільш суттєвих чинників є дефіцит заліза [2]. У 24% дітей дошкільного віку спостерігається фізіологічний дефіцит вітаміну А, а в 2,5% вагітних — нічна сліпота як наслідок дефіциту вітаміну А [6, 13]. У 70% дітей дошкільного віку існує дефіцит йоду [14], 16% населення має ризик неадекватного споживання цинку [15]. В Україні відзначаються також досить високі рівні виникнення вроджених вад розвитку у новонароджених, серед яких досить поширеними є вроджені дефекти невральної трубки [16], виникнення останніх здебільшого зумовлено дефіцитом фолієвої кислоти в організмі матері та плоду [17, 18]. З метою запобігання вродженим вадам розвитку [19, 20] в нашій країні свого часу розпочалася діяльність, спрямована на подолання дефіциту фолієвої кислоти у жінок репродуктивного віку шляхом її внесення у борошно та хлібобулочні вироби. Це є наочним прикладом

успішної промислової фортифікації. Ефективність застосування таких заходів для подолання вад розвитку невральної трубки підтверджена численними дослідженнями [21–25].

Як вже згадувалося, змінити поживні властивості рослинної харчової сировини можна не лише вносячи до її складу ті чи інші компоненти, але й змінюючи властивості самих рослин селекційним шляхом та завдяки генетично-інженерним технологіям. Утім, традиційна селекція ще не повністю вичерпала потенціал для отримання нових сортів основних харчових культур (кукурудзи, ріпаку, пшениці, квасолі, рису) з підвищеним вмістом мікронутрієнтів завдяки існуючій генетичній варіації в накопиченні цільових речовин [26]. Результати дослідження такої варіації для окремих сільськогосподарських рослин наведено в табл. 1. У пшениці та деяких інших культур виявлено суттєву генетичну варіацію вмісту так званих промоторних речовин, зокрема інуліну, які сприяють ефективному засвоєнню вітамінів та мінералів, що може бути використано традиційною селекцією для непрямого підвищення біологічної цінності рослинних харчових продуктів [27]. Мутації, які зумовлюють знизений вміст фітатів у кукурудзи, ячменю та рису, дозволили створити традиційними методами сорти відповідних культур зі знизеним вмістом солей фітинової кислоти в насінні і, відповідно, підвищеною біодоступністю мінеральних іонів при споживанні тваринами, підтвердженою дослідженнями [28]. Встановлено генотипну варіацію вмісту селену в сочевиці, яку передбачається використати для біофортифікації даної культури [29].

Однак для реалізації стратегії біофортифікації, ефективність традиційних методів селекції дещо обмежена порівняно зі значно

Таблиця 1. Генетично зумовлена варіація вмісту мікронутрієнтів у деяких сільськогосподарських культурах (мг/кг сухої маси) [27]

Сільськогосподарська культура		Варіація вмісту мікронутрієнта			
		Fe	Zn	Бета-каротин***	Аскорбінова кислота
Рис	коричневий	6–25	14–59	0–1	–
	очищений	1–14	14–38	–	–
Маніока	корені	4–76	3–38	1–24*	0–380*
	листя	39–263	15–109	180–960*	17–4200*
Квасоля		34–111**	21–54	0	–
Кукурудза		10–63	12–58	0–10	–
Пшениця		10–99**	8–177**	0–20	–

Примітка: * — для сирової маси; ** — включаючи диких родичів; *** — спектр для загального вмісту каротиноїдів набагато ширший.

ширшими можливостями методів генетичної інженерії. Тому біотехнологічні підходи дедалі ширше використовують для створення рослин з поліпшеними ознаками.

Існуючі стратегії дослідження функціонування генів та їх продуктів, поряд з ефективними методами трансформації та вдосконаленими системами оцінки якості нових отриманих рослин, дозволили встановити обмежувальні етапи у біосинтезі певних сполук і забезпечити основу для генетичного конструювання відповідних шляхів метаболізму рослин з підвищеною продуктивністю. Спрямовану експресію можна застосовувати для надання метаболічного нового напрямку, тоді як завдяки механізмам інгібування експресії генів можна зменшити або елімінувати небажані ознаки [30, 31].

Більшість рослин мають недостатній для задоволення потреб людини і тварин вміст основних амінокислот. Злаки (кукурудза, пшениця, рис тощо) зазвичай містять мало лізину, тимчасом як бобові (соя, квасоля, горох) часто бідні на сірковмісні амінокислоти метіонін та цистеїн. Вдалі приклади поліпшення амінокислотного балансу шляхом підвищення вмісту лізину описано для кукурудзи [32, 33], ріпаку та сої [34]. Зокрема в геному кукурудзи було внесено ген *dapA* бактерії *Corynebacterium glutamicum* Abe., що кодує чутливу до концентрації лізину форму ензиму дигідродіпіколінатсинтетази [35]. Але підвищений вміст лізину спостерігався лише в частини трансгенних рослин, що було зумовлено особливостями метаболічної регуляції. Введення генів, які кодують протеїни з бажаним вмістом амінокислот дає змогу спрямовано модифікувати склад запасного протеїну рослин, а проблему дефіциту в харчуванні окремих амінокислот може бути вирішено введенням в рослинний геном гена повністю штучного протеїну з підвищеним їх вмістом. Зокрема було створено й інтродуковано в сою під контролем насіннеспецифічного промотору синтетичний протеїн масою 11 кДа, що містив 16% метіоніну та 12% лізину [35, 36]. Аналогічним чином було модифіковано батат, що спричинило 2- та 5-кратне зростання загального вмісту протеїну в листі та коренях, відповідно [37]. Поряд із цим спостерігалось також значне підвищення вмісту амінокислот метіоніну, триптофану, треоніну, ізолейцину та лізину [37, 38]. Оскільки такі протеїни є повністю новими в раціоні людини, можливий вплив їх на здоров'я має бути детально досліджено. Є повідомлення про можливість непрямого

підвищення вмісту протеїнів і ліпідів у зернівках [39]. Використовуючи ген бактеріального ензиму цитокінінсинтезуючої ізопентенілтрансферази, було спровоковано утворення двох (замість одного) життєздатних зародків. У результаті отримали кукурудзу, зерно якої мало вищий вміст жирів та протеїнів і знижений вміст вуглеводів.

Фруктани (полімери фруктози) — важливий компонент повноцінної їжі; є докази позитивного впливу їх на здоров'я людини (як пробіотичних агентів) і запобігання онкологічним захворюванням шлунково-кишкового тракту. Деякі дослідження виявили високі рівні накопичення фруктанів у трансгенному цукровому буряку без негативного впливу на ріст чи фенотип рослини [40]. Існує сорт трансгенної картоплі, що синтезує спектр молекул інуліну (різновид фруктанів), які в природних умовах присутні в коренях артишоку [41]. Такі самі підходи було застосовано для різновидів сої, що містять деякі олігофруктанові компоненти, які здатні селективно збільшувати популяцію корисних видів бактерій у кишечнику людини і деяких тварин, та інгібують ріст шкідливих бактерій (*Escherichia coli*, *Salmonella* spp.) [42]. Створено генно-інженерну картоплю, яка містить крохмаль, що повільно перетравлюється через переважання вмісту амілози над вмістом амілопектину [43]. Клінічні дослідження показали, що цей «повільний» вид крохмалю за властивостями подібний до харчових волокон і має потенційну користь для людини [44, 45]. Маніпулювання вмістом та композицією харчових волокон у рослинах, кількісний та якісний склад яких безсумнівно перебуває під генетичним контролем, за допомогою біотехнологічних методів є також перспективним підходом до поліпшення якості продукції.

Використовуючи генетичну інженерію, можна оптимізувати склад жирів олійних культур. Приклади модифікованих олій — це олії зі змінним складом з ріпаку [46–49], сої [50, 51], бавовни [30, 52], кукурудзи [39], льону [53] тощо. Суттєвих змін жирнокислотного складу олійних культур було досягнуто шляхом традиційної селекції та індукованого мутагенезу. Продуктом модифікацій є рослини, з яких отримують олії з бажаними властивостями: соєва та ріпакова, що містять мало або взагалі не містять насичених жирних кислот, ріпакова з підвищеною часткою жирних кислот з карбоновими ланцюгами середньої довжини, з високим вмістом стеаринової кислоти, соєва з високим вмістом мононенасиченої олеїнової кислоти,

ріпакова з поліненасиченою гамма-ліноленовою і стеаридоною, довголанцюговими [54] та омега-3-жирними кислотами [55]. Експресія ацилтіоестерази з рослини *Cuphea hookeriana* Walp. у насінні трансгенного ріпаку дозволила отримати олію з високим вмістом капринової та каприлової кислот, які природно не накопичуються цією рослиною [47]. Інгібування експресії олеатдесатурази в сої сприяло тому, що вміст олеїнової кислоти в олії отриманих рослин досяг 80% (зазвичай — 23%), а поліненасичених жирних кислот — знизився [51]. Соева олія з високим вмістом олеїнової кислоти природно більш стійка до деградації під дією нагрівання та окиснення і отже майже не потребує гідрогенізації, що дозволяє отримати продукт без трансізомерів жирних кислот. Рослини ріпаку, до складу олії яких входять омега-3-ненасичені жирні кислоти, одержано шляхом внесення гена дельта-6-десатурази гриба з роду *Mortierella* [56]. Також створено соняшник, олія з насіння якого містить до 40% гамма-ліноленової кислоти, що в чотири рази більше, ніж у рослинах, які традиційно використовують для отримання цієї кислоти [57].

Завдяки тому, що було ізольовано ген ензиму гамма-токоферолметилтрансферази, який перетворює попередників з низькою біологічною активністю на більш активну складову вітаміну Е — альфа-токоферол [57], його вміст у насінні *Arabidopsis* було збільшено в 10 разів; подібний підхід застосовують для таких культур, як соя, кукурудза, ріпак. Створено трансгенну кукурудзу, в якій модифіковано одночасно три метаболічні шляхи синтезу цільових сполук, і, порівняно зі звичайними сортами, її ендосперм характеризується 169-кратним підвищенням вмісту бета-каротину, 6-кратним — аскорбінової кислоти та 2-кратним — фолату [58, 59]. Шліфоване зерно рису не містить бета-каротину та каротиноїдних попередників. Було клоновано більшість генів біосинтезу каротиноїдів рослин, на основі чого створили лінію рису з експресією бета-каротину в ендоспермі [60], переваги споживання якого вже доведено [39]. Отримано також трансгенні рослини рису, зерно якого містить втричі більше заліза, ніж зерно звичайного рису, завдяки введенню гена феритину сої під контролем ендосперм-специфічного промотору [61]. З метою подальшого підвищення вмісту заліза в зерні зараз активно вивчають можливість спрямовано впливати на його транспорт в рослинному організмі. Значно підвищено вміст біодоступного заліза в трансгенних рослинах куку-

рудзи за рахунок ендосперм-специфічної експресії привнесених генів рекомбінантного соєвого феритину та фітази гриба з роду *Aspergillus* [62]. Подібні результати було досягнуто для салату-латука [63]. Проведено дослідження внутрішньовидової генетичної варіації накопичення кальцію і магнію серед різновидів капусти (*Brassica oleracea* L.) та визначення відповідних QTL з метою подальшого створення трансгенних рослин з підвищеним вмістом цих елементів [64].

Серед інших здобутків — підвищена біодоступність фосфору, зниження рівня фітатів, підвищений вміст ізофлавоноїдів, збагачені фолатами томати [65, 66]. Епідеміологічні дослідження показали потенційну користь каротиноїду лікопену для зменшення ризику виникнення раку простати. У процесі створення томатів зі сповільненим досяганням неочікувано отримали рослини, плоди яких мали підвищений в 2–3,5 рази вміст лікопену порівняно з традиційними рослинами [67]. Стильбени, зокрема ресвератрол, що синтезуються багатьма видами рослин, виявляють антиканцерогенну дію [68], покращують стан хворих на серцево-судинні захворювання [69, 70], а також, імовірно, можуть подовжувати тривалість життя людини і тварин, впливаючи на генетичні механізми реалізації процесу старіння [71]. Накопичення ресвератролу було досягнуто у рослин люцерни, пшениці, ківі та томатів [72–77]. Інші сполуки, що викликають інтерес з погляду біофортифікації рослинної продукції, — це флавоноїди, глюкозинати та пов'язані з ними катехін і катехол; ізофлавоїди, зокрема геністеїн та дайдезін; антоціаніни та деякі фітоалексини.

Рослини продукують захисні сполуки, і багатьом із них, таким як ресвератрол та глюкозинати, притаманна значна протективна активність в організмі людини. Однак використання таких речовин може мати й протилежний ефект. Наприклад, фітат — запасна сполука фосфору в рослинах, є антинутриєнтом, який зв'язує залізо, кальцій, цинк та інші двовалентні мінеральні іони, що ускладнює їх засвоєння. Людина і тварини, окрім жуйних, не мають ензиму фітази, необхідного для руйнування фітатів, що, з одного боку, унеможливорює засвоєння накопиченого в них фосфору, а з іншого — спричинює транзитне проходження через організм зв'язаних з фітатами іонів [78]. Надлишок фосфатів, які виробники тваринної продукції штучно додають у раціони тварин, екскретується в навколишнє середовище як забрудник. Використання сої та

кукурудзи з низьким вмістом фітатів для годування тварин може суттєво зменшити екскрецію фосфатів. Експериментально показано, що протеїн сортів сої зі зниженим вмістом фітатів краще перетравлюється, ніж протеїн традиційних соєвих бобів [79]. Кукурудзу зі зменшеним вмістом фітатів було комерціалізовано у США в 1999 р. [80].

Іншими антинутриєнтами, усунення яких з рослинних продуктів становить важливе завдання, є інгібітори трипсину, лектини та деякі стійкі до нагрівання компоненти, відомі у сої та деяких рослин. Окрім того, розпочалися й активно проводяться дослідження з видалення чи зниження рівня в рослинах харчових алергенів (альбуміни, глобуліни тощо), токсинів (глікоалкалоїди, ціаногенні глікозиди, фітогемаглютиніни), а також інших небажаних харчових компонентів, зокрема глютену, кофеїну тощо [81]. Генно-інженерними методами створено сою, що не містить алергена р34, відповідні клінічні дослідження підтвердили відсутність накопичення специфічних антитіл у чутливих людей при її споживанні [31], а також рис, що не містить алергенних протеїнів 14–16 кДа [82]. Зміна рівня експресії гена тиредоксину в пшениці та інших злаках дозволяє еліминувати сполуки, що спричинюють негативні ефекти [83]. Біотехнологічні методи можуть бути використані для суттєвого послаблення експресії або навіть елімінації генів, що відповідають за накопичення та/або активацію небажаних сполук у рослинах. Наприклад в деяких лініях картоплі суттєво зменшено вміст соланіну, робляться також спроби знизити загальний вміст глікоалкалоїдів тощо [84]. Використання експресії ензиму маніоки гідроксинітрилліази в її коренях дозволило створити рослини зі зниженим вмістом ціаногенних глікозидів [85].

У табл. 2 узагальнено інформацію про сільськогосподарські культури, які були генетично модифіковані з метою поліпшення їхніх харчових властивостей.

Таким чином, доступні зараз методи геноміки та біоінформатики дали можливість маніпулювати генами в межах видів, родів та царств і вивчати експресію та взаємодію трансгенів із множинами ендогенних генів одночасно. Використання нових можливостей та більш поглиблене і детальне вивчення вторинного метаболізму рослин дадуть змогу ефективно модифікувати поживний склад різних сільськогосподарських культур [80].

Водночас питання безпеки нових харчових продуктів, що отримані генно-інженерним шляхом, є предметом постійної

й цілком зрозумілої уваги. Стосовно цього варто зауважити, що такі міжнародні організації, як ФАО та ВООЗ, дійшли висновку, що потенційно небезпечні фактори, пов'язані з технологією генетичної модифікації, нічим не відрізняються від небезпечних факторів, що пов'язані з методами, які широко використовують за традиційної селекції, однак потребують ретельного вивчення молекулярних характеристик [81–122].

Початковим пунктом оцінювання безпеки харчового продукту, одержаного з генетично модифікованого організму, є так звана концепція «композиційної еквівалентності» з найбільш подібним не трансгенним продуктом, у цьому разі композиційну еквівалентність чи відсутність її встановлюють для визначення подальшої оцінки безпеки. Такий підхід не дає змоги встановити абсолютну безпеку і на основі того, що модифікований продукт є композиційно еквівалентним відповідному звичайному продукту, можна лише стверджувати, що він так само безпечний, як і відповідний, і таким його варто розглядати [122]. Це виправдано з огляду на те, що більшість традиційних рослинних харчових продуктів зі значним досвідом споживання людиною містять ті чи інші небезпечні речовини (соланін та хаколін — картопля, лінамарин — лімська квасоля, ціаногенні глікозиди — корені маніоки, лотаустралін — турецький горох, численні алергени), про що вже згадувалося вище, але загальноприйняті методи та способи оброблення, приготування і споживання мінімізують дію на організм людини цих небажаних сполук.

Проведені дослідження показують, що генетично змінені рослини мають склад більш подібний до батьківських ліній, які використано для їх розроблення, ніж інші лінії того самого виду і роду, а часто через різні умови та місце вирощування існує навіть сильніша варіація, ніж та, що була наслідком модифікації. Цей ефект, зокрема, спостерігався у протеомі картоплі [123], томатів [124] та пшениці [125]. Паралельні результати відзначено у метаболомних рівнях пшениці [126] і картоплі [127]. Це свідчить на користь безпеки рослин з модифікованими властивостями, адже мінливість їхнього складу не виходить за межі складу рослин, стосовно яких існує досвід тривалого споживання.

За добу людина споживає близько 0,1–1 г чужинної ДНК [128], однак досі відсутні повідомлення про включення інтактних генів чи фрагментів ДНК з харчових продуктів у генетичний матеріал людини чи тварин. Немає основ для припущень, що перенесення

Таблиця 2. Генетично модифіковані рослини з поліпшеними харчовими властивостями

Ознака, за якою проводили модифікацію	Рослинна культура (предмет і напрям модифікації)	Джерело
Вміст і склад протеїну	Ріпак (АК склад)	46
	Кукурудза (АК склад, протеїн ↑)	34, 39, 86
	Картопля (АК склад, протеїн ↑)	87–89
	Рис (АК склад, протеїн ↑)	90
	Соя (баланс АК)	91, 92
	Батат (протеїн ↑)	37
Амінокислотний склад	Ріпак (лізин ↑)	34
	Кукурудза (лізин ↑, метіонін ↑)	92
	Картопля (метіонін ↑)	93
	Сорго (лізин ↑)	95
	Соя (лізин ↑, триптофан ↑)	36, 96
Вміст і склад жирних кислот	Ріпак (лаурилова к-та ↑, гамма-ліноленова к-та ↑; +ω-3-жирні к-ти; 8:0 та 10:0 жирні к-ти ↑; лаурилова та міристинова к-та ↑; олеїнова к-та ↑)	44–49
	Бавовна (олеїнова ↑, олеїнова + стеаринова к-ти ↑)	30, 52
	Насіння льону (+ω-3- та ω-6-жирні к-ти)	53
	Кукурудза (ліпіди ↑)	39
	Рис (α-ліноленова к-та ↑)	97
	Соя (олеїнова к-та ↑, гамма-ліноленова к-та ↑)	50, 51
Вміст вуглеводів	Кукурудза (фруктан ↑)	98
	Картопля (фруктан ↑)	99
	Цукровий буряк (фруктан ↑)	100
	Соя (фруктоза ↑, рафіноза ↑)	101
	Картопля (інулін ↑)	41
	Картопля (амілоза ↑)	43
	Рис	102
Вміст вітамінів та каротиноїдів	Ріпак (вітамін Е ↑)	58
	Кукурудза (вітамін Е ↑, вітамін С ↑)	103–105
	Гірчиця (+бета-каротин)	106
	Картопля (+бета-каротин та лютеїн ↑)	107
	Рис (+бета-каротин)	60
	Полуниця (вітамін С ↑)	109
	Томати (фолат ↑, фітоен ↑, бета-каротин ↑, лікопен ↑, провітамін А ↑)	65, 67, 109–112
Вміст функціональних вторинних метаболітів	Яблуня (+стильбени)	72
	Люцерна (+ресвератрол)	73
	Ківі (+ресвератрол)	74
	Кукурудза (флавоноїди ↑)	113
	Картопля (антоціан та алкалоїдні глікозиди ↓, соланін ↓)	114
	Рис (флавоноїди ↑, +ресвератрол)	75, 115
	Соя (флавоноїди ↑)	116
	Томати (+ресвератрол, хлорогенова к-та ↑, флавоноїди ↑, стильбен ↑)	76, 77, 109, 117
Біодоступність мінералів	Люцерна (фітаза ↑)	118
	Салат-латук (залізо ↑)	63
	Рис (залізо ↑)	60
	Кукурудза (фітаза ↑, феритин ↑)	62
	Соя (фітаза ↑)	119
	Пшениця (фітаза ↑)	120

Примітка. ↑ — підвищення вмісту; ↓ — зниження вмісту; «+» — привнесення нової ознаки. Модифіковано з [38, 78, 123].

генів із ГМ рослин більш імовірно, ніж перенесення генів від будь-яких інших рослин, також немає документально зафіксованих даних про те, що гени з рослин переносяться в мікроорганізми кишечника [122]. Численні дослідження показали, що специфічні фрагменти ДНК або протеїни, що походять від генетично модифікованих рослин, не виявляють у тканинах та рідинах сільськогосподарських тварин, яких годували цими рослинами. Немає відтворених даних про те, що модифікована ДНК у комерціалізованих генно-інженерних рослинах має особливу поведінку, порівняно з ДНК звичайних рослин [129]. Беручи до уваги ці фактори та з урахуванням застосовуваних на цей час методів для здійснення генетичних модифікацій, було зроблено висновок, що «ДНК із ГМО є такою ж безпечною, як і будь-яка інша ДНК, що присутня в їжі» [130].

Складніші втручання в метаболізм рослин потребуватимуть більш суворого контролю, ніж прості модифікації. Невід'ємною частиною процесу оцінювання має бути складання повної молекулярної характеристики введених генів і врахування наслідків перенесення, якщо воно відбудеться. Існуючі на сьогодні системи моніторингу та оцінки безпечності уможливають ефективно виявлення небажаних відхилень та запобігання негативним наслідкам використання генетичної модифікації рослин [38, 121, 131].

У контексті сказаного цілком очевидно, що активна реалізація стратегії біофортифікації дозволить отримувати й використовувати рослини з поліпшеними та новими цінними властивостями, які значно краще забезпечуватимуть потреби людства у якісних, поживних і здорових харчових продуктах, що в межах інтегрованого комплексу заходів із модифікації рослин для різних цілей сприятиме вирішенню глобальних проблем на фоні запровадження принципово нового господарювання та прогресивного розвитку. Незважаючи на очевидні здобут-

ки методів традиційної селекції, зараз пріоритетним напрямом для отримання рослин з поліпшеними та новими властивостями є використання біотехнологічних прийомів, зокрема генетичної інженерії, які мають низку суттєвих переваг у використанні, порівняно з традиційними, але, поряд із цим, привертають цілком зрозумілу увагу до питання про їх безпечність. Виправданим і розумним у цій ситуації є застосування поміркованого, цивілізованого, науково обґрунтованого підходу до вирішення питань, які нині є предметом суперечок і обмежують використання генетичної інженерії рослин, створення системи регулювання, яка дозволить максимально використати переваги нових технологій і, водночас, уникнути чи мінімізувати пов'язані з цим ризики.

Світове співтовариство в низці документів Copenhagen Consensus 2008 сформулювало 30 пріоритетних стратегій, застосування яких сприятиме найбільш ефективному та економічно здійсненному вирішенню основних світових проблем [132]. У цих документах окреслено 10 головних загальносвітових проблем, вирішення яких передбачає застосування різних стратегій. Однією з головних проблем сучасності визначено проблему голоду та недоїдання. Розв'язання її, поряд з низкою інших заходів, передбачає застосування стратегії біофортифікації, яка визнається такою, що має великий потенціал і серед запропонованих загалом 30 стратегій для вирішення глобальних проблем посідає 5-те місце за показником співвідношення необхідних для реалізації витрат/масштабів очікуваного позитивного впливу внаслідок цієї реалізації [133, 134], що також ілюструє табл. 3.

Україна, як євродержава з потужним сільськогосподарським потенціалом, має не повторювати помилок минулого і в жодному разі не може залишатись осторонь глобальних процесів, що передбачають вирішення нагальних проблем, пов'язаних з якістю та достатністю харчування завдяки сучасній біотехнології.

Таблиця 3. Зіставлення потенційних результатів застосування різних стратегій для вирішення світових проблем, пов'язаних із харчуванням, на прикладі ефективності використання коштів у сумі 80 млн. дол. США [16]

Тип стратегії та результат застосування		
Розповсюдження фармпрепаратів, що містять терапевтичні дози вітамінів	Фортифікація	Біофортифікація з використанням методів традиційної селекції
80 млн. жінок і дітей у Пд. Азії (кожен 15-й від загальної чисельності населення регіону) протягом двох років зможуть отримувати препарат вітаміну А	Фортифікація харчових продуктів залізом для 33% населення Пд. Азії протягом двох років	Створення шести сільськогосподарських культур з підвищеним вмістом мікронутрієнтів для розповсюдження в усьому світі та використання протягом необмеженого періоду часу

ЛІТЕРАТУРА

1. *The World Health Report 2002: reducing risks, promoting healthy life: overview.* — Geneva: WHO, 2002 (WHO/WHR/02.1).
2. *Worldwide prevalence of anaemia 1993–2005/* Eds. Benoist B., McLean E., Egli J. et al. — WHO global database on anaemia. — Geneva: WHO, 2008.
3. *Iron deficiency anaemia: assessment, prevention and control. A guide for programme managers.* — Geneva: WHO, 2001 (WHO/NHD/01.3).
4. *Global Prevalence of Vitamin A Deficiency.* Micro-nutrient Deficiency Information. Syst. Work. Pap. No. 2. — Geneva: WHO, 1995 (WHO/NUT/95.3.).
5. *De Benoist B., Andersson M., Egli I. et al.* Iodine status worldwide // WHO Global Database on Iodine Deficiency. — Geneva: WHO, 2004.
6. *Allen L., de Benoist B., Dary O. et al.* Guidelines on food fortification with micronutrients. — WHO. FAO UN, 2006.
7. *Brown K. H., Wuehler S. E.* Zinc and human health: Results of recent trials and implications for program interventions and research. — Ottawa, Canada: The Micronutrient Initiative / International Development Research Centre, 2000.
8. *McLean E., de Benoist B., Allen L. H.* Review of the magnitude of Folate and Vitamin B12 deficiencies worldwide. — Geneva: WHO, 2005.
9. *Shibuya K., Murray C. J. L.* Congenital anomalies / Murray C. J. L., Lopez A. D., eds. Health dimensions of sex and reproduction. — Boston: Harvard University Press, 1998. — P. 455–512.
10. *Fox T. E., Fairweather-Tait S.* Selenium // The mineral fortification of foods. — Leatherhead, Surrey, Leatherhead Publishing, 1999. — P. 112–153.
11. *Trace Elements in Human Nutrition and Health.* — Geneva: WHO, 1996.
12. *Корецький В. Л., Орлова Н. М.* До проблеми безпеки харчування та моніторингу якості життя населення України // Пробл. харчування. — 2006. — № 1. — С. 42–44.
13. *WHO.* Global prevalence of vitamin A deficiency in populations at risk 1995–2005 // WHO global database on vitamin A deficiency. — Geneva: WHO, 2009.
14. *WHO global database on iodine deficiency* (<http://www.who.int/vmnis/iodine/data/en/index.html>).
15. *Proportion of population at risk of inadequate intake of zinc // IZiNCG, Estimated Risk of Zinc deficiency by Country.* — FNB. — 2004. — V. 25, N 1.
16. *Баріляк І. Р.* Проблеми профілактики спадкової патології та вроджених вад розвитку // Журн. АМН України. — 2003. — Т. 9, № 4. — С. 656–667.
17. *Czeizel A. E.* Prevention of the first occurrence of neural tube defects by periconceptional vitamin supplementation // N. Engl. J. Med. — 1992. — V. 327, N 26. — P. 1832–1835.
18. *Walle H. E. K. de, Reefhuis J., Cornel M. C.* Folic acid prevents more than neural tube defects; a registry-based study in the Netherlands // Eur. J. Hum. Gen. — 2001. — V. 9, N 51. — P. 261.
19. *Баріляк І. Р., Вертелецький В.* Роль громадських організацій у формуванні охорони здоров'я // Тези доп. ІХ конгресу СФУЛТ (Луганськ, 19–22 серпня 2002 р.) — Луганськ — Київ — Чикаго, 2002. — С. 74.
20. *Baryliak I., Kharytonova I., Wertelecky W.* Promotion of birth defects prevention Aliances // Eur. J. Hum. Gen. — 2001. — V. 9. — P. 175.
21. *Czeizel A. E., Dudas I.* Prevention of the first occurrence of neural tube defects by periconceptional vitamin supplementation // N. Engl. J. Med. — 1992. — V. 327, N 26. — P. 1832–1835.
22. *Wald N., Sneddon J., Densm J. et al.* Prevention of neural tube defects: results of the medical research council vitamin study // Lancet. — 1991. — V. 338, N 8760. — P. 131–137.
23. *Berry R. J., Li Z., Erickson J. D. et al.* Prevention of neural tube defects with folic acid in China // N. Engl. J. Med. — 1999. — V. 341, N 20. — P. 1485–1490.
24. *Van Allen M. I., Boyle E., McFadderi D. et al.* The impact of prenatal diagnosis and folic acid (FA) supplementation on prevention of neural tube defects in British Columbia // Europ. J. Hum. Gen. — 2001. — V. 9, N 51. — P. 162.
25. *Баріляк І. Р., Качура В. С., Неумержицька Л. В., Кузнєцова Г. М.* Антитератогенна дія фолієвої кислоти та її роль в запобіганні злоякісних пухлин і серцево-судинних захворювань // Совр. пробл. токсикол. — 2002. — № 2. — С. 7–14.
26. *Biofortified Crops For Improved Human Nutrition. A Challenge Program Proposal.* International Center For Tropical Agriculture (CIAT). Food Policy Research Institute (IFPRI) / International Consortium of Collaborative Partners. — 3 September 2002.
27. *Genc Y., Humphries J. M., Lyons G. H., Graham R. D.* Exploiting genotypic variation in plant nutrient accumulation to alleviate micronutrient deficiency in populations // J. Trace Elem. Med. Biol. — 2005. — V. 18, N 4. — P. 319–24.
28. *Raboy V.* Progress in Breeding Low Phytate Crops // J. Nutr. — 2002. — V. 132. — P. 503–505.
29. *Thavarajah D., Ruszkowski J., Vandenberg A.* High potential for selenium biofortification of lentils (*Lens culinaris L.*) // J. Agric. Food Chem. — 2008. — V. 56, N 22. — P. 10747–10753.
30. *Liu Q., Singh S., Green A.* High-oleic and high-stearic cottonseed oils: nutritionally improved cooking oils developed using gene silencing // J. Am. Coll. Nutr. — 2002. — V. 21. — P. 205–211.
31. *Herman E. M., Helm R. M., Jung R., Kinney A. J.* Genetic modification removes an immunodominant allergen from soybean // Plant. Physiol. — 2003. — V. 132. — P. 36–43.
32. *O'Quinn P. R., Nelssen J. L., Goodband R. D. et al.* Nutritional value of a genetically improved high-lysine, high-oil corn for young pigs // J. Anim. Sci. — 2000. — V. 78. — P. 2144–2149.
33. *Eggeling L., Oberle S., Sahm H.* Improved L-lysine yield with *Corynebacterium glutamicum*:

- use of *dapA* resulting in increased flux combined with growth limitation // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* — 1998. — V. 49. — P. 24–30.
34. *Falco S. C., Guida T., Locke M. et al.* Transgenic canola and soybean seeds with increased lysine // *Biotechnology.* — 1995. — V. 13. — P. 577–582.
 35. *Beauregard M., Dupont C., Hefford M.A.* Design, expression and initial characterization of MB1, a *de novo* protein enriched in essential amino acids // *Ibid.* — 1995. — V. 13. — P. 974–981.
 36. *Simmonds D. H., Donaldson P. A.* Genotype screening for proliferative embryogenesis and biolistic transformation of short-season soybean genotypes // *Plant. Cell. Rep.* — 2000. — V. 19. — P. 485–490.
 37. *Egnin M., Prakash C. S.* Transgenic sweet potato expressing a synthetic storage protein gene exhibits high level of total protein and essential amino acids // *In Vitro Cell. Dev. Biol.* — 1997. — V. 33. — P. 52.
 38. *International Life Sciences Institute.* Nutritional and safety assessments of foods and feeds nutritionally improved through biotechnology: case studies // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* — 2008. — V. 7. — P. 50–99.
 39. *Young T. E., Giesler-Lee J., Gallie D. R.* Senescence-induced expression of cytokinin reverses pistil abortion during maize flower development // *Plant J.* — 2004. — V. 38. — P. 910–922.
 40. *Sévenier R., Hall R. D., van der Meer I. M. et al.* High level fructan accumulation in a transgenic sugar beet // *Nat. Biotechnol.* — 1998. — V. 16. — P. 843–846.
 41. *Hellwege E. M., Czaplak S., Jahnke A. et al.* Transgenic potato (*Solanum tuberosum*) tubers synthesize the full spectrum of inulin molecules naturally occurring in globe artichoke (*Cynara scolymus*) roots // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2000. — V. 97. — P. 8699–8704.
 42. *Bouhnik Y., Vahodi K., Achour L. et al.* Short-chain fructo-oligosaccharide administration dose-dependently increases fecal bifidobacteria in healthy humans // *J. Nutr.* — 1999. — V. 129. — P. 113–116.
 43. *Schwall G. P., Safford R., Westcott R. J. et al.* Production of very-high-amylose potato starch by inhibition of SBE A and B // *Nat. Biotechnol.* — 2000. — V. 18. — P. 551–554.
 44. *Yue P., Waring S.* Resistant starch in food applications // *Cereal Foods World.* — 1998. — V. 43. — P. 690–695.
 45. *Richardson P. H., Jeffcoat R., Shi Y. C.* High-amylose starches: from biosynthesis to their use as food. — *MRS Bull.* December, 2000. — P. 20–24.
 46. *Roesler K., Shintani D., Savage L. et al.* Targeting of the Arabidopsis homomeric acetyl-coenzyme A carboxylase to plastids of rapeseeds // *Plant Physiol.* — 1997. — V. 113 — P. 75–81.
 47. *Dehesh K., Jones A., Knutzon D. S., Voelker T. A.* Production of high levels of 8:0 and 10:0 fatty acids in transgenic canola by overexpression of Ch FatB2, a thioesterase cDNA from *Cuphea hookeriana* // *Plant J.* — 1996. — V. 9. — P. 167–172.
 48. *Froman B., Ursin V.* Genetic modification of oils for improved health benefits: production of long chain omega-3 fatty acids in plants // *Abst. Papers Amer. Chem. Soc.* — 2002. — V. 223. — U. 35.
 49. *James M. J., Ursin V. M., Cleland L. G.* Metabolism of stearidonic acid in human subjects: comparison with the metabolism of other n-3 fatty acids // *Am. J. Clin. Nutr.* — 2003. — V. 77. — P. 1140–1145.
 50. *Reddy A. S., Thomas T. L.* Expression of a cyanobacterial DELTA 6-desaturase gene results in gamma-linolenic acid production in transgenic plants // *Nat. Biotechnol.* — 1996. — V. 14. — P. 639–642.
 51. *Kinney A. J., Knowlton S.* Designer oils: the high oleic acid soybean // *Genetic Modification in the Food Industry - Blackie Academic and Professional, London, 1998.* — P. 193–213.
 52. *Chapman K. D., Austin-Brown S., Sparace S. A. et al.* Transgenic cotton plants with increased seed oleic acid content // *J. Am. Oil Chem. Soc.* — 2001. — V. 78. — P. 941–947.
 53. *Abadi A., Domergue F., Bauer J. et al.* Biosynthesis of very-long-chain polyunsaturated fatty acids in transgenic oilseeds: constraints on their accumulation // *Plant Cell.* — 2004. — V. 16. — P. 2734–2748.
 54. *Zou J., Katavic V., Giblin E. M. et al.* Modification of seed oil content and the acyl composition in the *Brassicaceae* by expression of a yeast sn-2 acyltransferase gene // *Ibid.* — 1997. — V. 9. — P. 909–923.
 55. *Yuan L., Knauf V. C.* Modification of plant components // *Curr. Opin. Biotechnol.* — 1997. — V. 8. — P. 227–233.
 56. *Ursin V.A.* Modification of plant lipids for human health: development of functional land-based omega-3 fatty acids // *Symposium: Improving Human Nutrition through Genomics, Proteomics and Biotechnologies.* American Society for Nutritional Sciences, Bethesda, MD, 2003. — P. 4271–4274.
 57. *Arcadia Biosciences.* Arcadia Biosciences and Bioriginal Food and Science Corp. enter strategic alliance to market high GLA sunflower oil. *Business Wire.* — 2008. (http://findarticles.com/p/articles/mi_m0EIN/is_ai_n24320185).
 58. *Shintani D., Della Penna D.* Elevating the vitamin E content of plants through metabolic engineering // *Science.* — 1998. — V. 282. — P. 2098–2100.
 59. *Naqvi S., Zhu C., Ferre G. et al.* Transgenic multivitamin corn through biofortification of endosperm with three vitamins representing three distinct metabolic pathways // *PNAS.* — 2009. — V. 106, N 19. — P. 7762–7767. (www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0901412106).
 60. *Ye X., Al-Babili S., Klott A. et al.* Engineering the provitamin A (beta-carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm // *Science.* — 2000. — V. 287. — P. 303–305.

61. *Lucca P., Hurrell R., Potrykus I.* Fighting iron deficiency anemia with iron-rich rice // *J. Am. Coll. Nutr.* — 2002. — V. 21. — P. 184–190.
62. *Drakakaki G., Marcel S., Glahn R. P. et al.* Endosperm-specific co-expression of recombinant soybean ferritin and *Aspergillus* phytase in maize results in significant increases in the levels of bioavailable iron // *Plant Mol. Biol.* — 2005. — V. 59. — P. 869–880.
63. *Goto F., Yoshihara T., Saiki H.* Iron accumulation and enhanced growth in transgenic lettuce plants expressing the iron-binding protein ferritin // *Theor. Appl. Genet.* — 2000. — V. 100. — P. 658–664.
64. *Broadley M. R., Hammond J. P., King G. J. et al.* Shoot calcium and magnesium concentrations differ between subtaxa, are highly heritable, and associate with potentially pleiotropic loci in *Brassica oleracea* // *Plant Physiol.* — 2008. — V. 146. — P. 1707–1720.
65. *Della Penna D.* Biofortification of plant-based food: enhancing folate levels by metabolic engineering // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2007. — V. 104. — P. 3675–3676.
66. *Yonekura-Sakakibara K., Tohge T., Niida R., Saito K.* Identification of a flavonol 7-O-rhamnosyltransferase gene determining flavanoid pattern in *Arabidopsis* by transcriptome coexpression analysis // *J. Biol. Chem.* — 2007. — V. 282. — P. 14932–14941.
67. *Mehta R. A., Cassol T., Li N. et al.* Engineered polyamine accumulation in tomato enhances phytonutrient content, juice quality, and vine life // *Nat. Biotechnol.* — 2002. — V. 20. — P. 613–618.
68. *Jang M., Cai L., Udeani G. et al.* Cancer chemopreventive activity of resveratrol, a natural product derived from grapes // *Science.* — 1997. — V. 275. — P. 218–220.
69. *Frankel E. N., Waterhouse A. L., Kinsella J. E.* Inhibition of human LDL oxidation by resveratrol // *Lancet.* — 1993. — V. 341. — P. 1103–1104.
70. *Wieder T., Prokop A., Bagci B. et al.* Piceatannol, a hydroxylated analog of the chemopreventive agent resveratrol, is a potent inducer of apoptosis in the lymphoma cell line BJAB and in primary, leukemic lymphoblasts // *Leukemia.* — 2001. — V. 15. — P. 1735–1742.
71. *Baur J. A.* Resveratrol improves health and survival of mice on a highcalorie diet // *Nature.* — 2006. — V. 444. — P. 280–281.
72. *Szankowski I., Briviba K., Fleschhut J. et al.* Transformation of apple (*Malus domestica* Borkh.) with the stilbene synthase gene from grapevine (*Vitis vinifera* L.) and a PGIP gene from kiwi (*Actinidia deliciosa*) // *Plant Cell Rep.* — 2003. — V. 22. — P. 141–149.
73. *Hipskind J. D., Paiva N. L.* Constitutive accumulation of a resveratrolglucoside in transgenic alfalfa increases resistance to *Phoma medicaginis* // *Mol. Plant Microbe Interact.* — 2000. — V. 13. — P. 551–562.
74. *Szankowski I., Briviba K., Fleschhut J. et al.* Kiwifruits (*Actinidia deliciosa*) transformed with a *Vitis* stilbene synthase gene produce piceid (resveratrol-glucoside) // *Plant Cell Rep.* — 2000. — V. 19. — P. 904–910.
75. *Stark-Lorenzen P., Nelke B., Hanssler G. et al.* Transfer of a grapevine stilbene synthase gene to rice (*Oryza sativa* L.) // *Ibid.* — 1997. — V. 16. — P. 668–673.
76. *Niggeweg R., Michael A. J., Martin C.* Engineering plants with increased levels of the antioxidant chlorogenic acid // *Nat. Biotechnol.* — 2004. — V. 22. — P. 746–754.
77. *Giovinazzo G., d'Amico L., Paradiso A. et al.* Antioxidant metabolite profiles in tomato fruit constitutively expressing the grapevine stilbene synthase gene // *Plant Biotechnol. J.* — 2005. — V. 3. — P. 57–69.
78. *Newell-McGloughlin M.* Nutritionally Improved Agricultural Crops // *Plant Physiol.* — 2008. — V. 147. — P. 939–953.
79. *Keshavarz K.* The effect of different levels of non-phytate phosphorus with and without phytase on the performance of four strains of laying hens // *Poult. Sci.* — 2003. — V. 82. — P. 71–91.
80. *Wehrspann J.* New traits of seed buying // *Farm. Industry News.* — 1998. — V. 31. — P. 10.
81. *Ogita S., Uefuji H., Yamaguchi Y. et al.* Producing decaffeinated coffee plants // *Nature.* — 2003. — V. 423. — P. 823.
82. *Tada Y., Nakase M., Adachi T. et al.* Reduction of 14–16 kDa allergenic proteins in transgenic rice plants by antisense gene // *FEBS Lett.* — 1996. — V. 391. — P. 341–345.
83. *Buchanan B. B., Adamidi C., Lozano R. M. et al.* Thioredoxin-linked mitigation of allergic responses to wheat // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 1997. — V. 94. — P. 5372–5377.
84. *McCue K. F., Allen P. V., Rockhold D. R. et al.* Reduction of total steroidal glycoalkaloids in potato tubers using antisense constructs of a gene encoding a solanidine glucosyl transferase // *Acta Hort.* — 2003. — V. 619. — P. 77–86.
85. *Siritunga D., Sayre R. T.* Generation of cyanogen-free transgenic cassava // *Planta.* — 2003. — V. 217. — P. 367–373.
86. *Yang S. H., Moran D. L., Jia H. W. et al.* Expression of a synthetic porcine alpha-lactalbumin gene in the kernels of transgenic maize // *Transgenic Res.* — 2002. — V. 11. — P. 11–20.
87. *Yu J., Ao G.* Expression of 10 kDa sulfur-rich prolamin gene of rice in potato // *Acta. Bot. Sin.* — 1997. — V. 39. — P. 329–334.
88. *Chakraborty S., Chakraborty N., Datta A.* Increased nutritive value of transgenic potato by expressing a nonallergenic seed albumin gene from *Amaranthus hypochondriacus* // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2000. — V. 97. — P. 3724–3729.
89. *Li L., Liu S. M., Hu Y. L. et al.* Increase of sulfur-containing amino acids in transgenic potato with 10 kD zein gene from maize // *Chin. Sci. Bull.* — 2001. — V. 46. — P. 482–484.
90. *Katsube T., Kurisaka N., Ogawa M. et al.* Accumulation of soybean glycinin and its assembly with the glutelins in rice // *Plant Physiol.* — 1999. — V. 120. — P. 1063–1074.
91. *Dinkins R. D., Reddy M. S. S., Meurer C. A. et al.* Increased sulfur amino acids in soybean plants overexpressing the maize 15 kDa zein

- protein // *In Vitro Cell Dev. Biol. Plant.* — 2001. — V. 37. — P. 742–747.
92. *Rapp W.* Development of soybeans with improved amino acid composition // 93rd AOCs Annual Meeting and Expo, Montreal, 5–8 May 2002. — American Oil Chemists' Society Press, Champaign, IL, 2002. — P. 79–86.
93. *Lai J. S., Messing J.* Increasing maize seed methionine by mRNA stability // *Plant J.* — V. 30. — P. 395–402.
94. *Zeh M., Casazza A. P., Kreft O. et al.* Antisense inhibition of threonine synthase leads to high methionine content in transgenic potato plants // *Plant Physiol.* — 2001. — V. 127. — P. 792–802.
95. *Zhao Z.-Y., Glassman K., Sewalt V. et al.* Nutritionally improved transgenic sorghum // *Plant Biotechnology 2002 and Beyond.* — Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003. — P. 413–416.
96. *Galili G., Galili S., Lewinsohn E., Tadmor Y.* Genetic, molecular, and genomic approaches to improve the value of plant foods and feeds // *Plant Sci.* — 2002. — V. 21. — P. 167–204.
97. *Anai T., Koga M., Tanaka H. et al.* Improvement of rice (*Oryza sativa* L.) seed oil quality through introduction of a soybean microsomal omega-3 fatty acid desaturase gene // *Plant Cell Rep.* — 2003. — V. 21. — P. 988–992.
98. *Caimi P. G., McCole L. M., Klein T. M., Kerr P. S.* Fructan accumulation and sucrose metabolism in transgenic maize endosperm expressing a *Bacillus amyloliquefaciens* SacB gene // *Plant Physiol.* — 1996. — V. 110. — P. 355–363.
99. *Hellwege E. M., Gritscher D., Willmitzer L., Heyer A. G.* Transgenic potato tubers accumulate high levels of 1-kestose and nystose: functional identification of a sucrose 1-fructosyltransferase of artichoke (*Cynara scolymus*) blossom discs // *Plant J.* — 1997. — V. 12. — P. 1057–1065.
100. *Smeeckens S.* Engineering plant metabolism // *Trends Plant Sci.* — 1997. — V. 2. — P. 286–287.
101. *Hartwig E. E., Kuo T. M., Kenty M. M.* Seed protein and its relationship to soluble sugars in soybeans // *Crop Sci.* — 1997. — V. 37. — P. 770–773.
102. *Chiang C., Yeh F., Huang L. et al.* Expression of a bi-functional and thermostable amylopullulanase in transgenic rice seeds leads to autohydrolysis and altered composition of starch // *Mol. Breed.* — 2005. — V. 15. — P. 125–143.
103. *Rocheford T. R., Wong J. C., Egesel C. O., Lambert R. J.* Enhancement of vitamin E levels in corn // *J. Am. Coll. Nutr.* — 2002. — V. 21. — P. 191–198.
104. *Cahoon E. B., Hall S. E., Ripp K. G. et al.* Metabolic redesign of vitamin E biosynthesis in plants for tocotrienol production and increased antioxidant content // *Nat. Biotechnol.* — 2003. — V. 21. — P. 1082–1087.
105. *Chen Z., Young T. E., Ling J. et al.* Increasing vitamin C content of plants through enhanced ascorbate recycling // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2003. — V. 100. — P. 3525–3530.
106. *Shewmaker C. K., Sheehy J. A., Daley M. et al.* Seed specific overexpression of phytoene synthase: increase in carotenoids and other metabolic effects // *Plant J.* — 1999. — V. 20. — P. 401–412.
107. *Ducreux L. J. M., Morris W. L., Hedley P. E. et al.* Metabolic engineering of high carotenoid potato tubers containing enhanced levels of β -carotene and lutein // *J. Exp. Bot.* — 2005. — V. 56. — P. 81–89.
108. *Agius F., Gonzalez-Lamothé R., Caballero J. L. et al.* Engineering increased vitamin C levels in plants by overexpression of a D-galacturonic acid reductase // *Nat. Biotechnol.* — 2003. — V. 21. — P. 177–181.
109. *Rosati C., Aquilani R., Dharmapuri S. et al.* Metabolic engineering of β -carotene and lycopene content in tomato fruit // *Plant J.* — 2000. — V. 24. — P. 413–419.
110. *Fraser P. D., Romer S., Kiano J. W. et al.* Elevation of carotenoids in tomato by genetic manipulation // *J. Sci. Food Agric.* — 2001. — V. 81. — P. 822–827.
111. *Dy'az R., Quinlivan E. P., Klaus S. M. et al.* Folate biofortification in tomatoes by engineering the pteridine branch of folate synthesis // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2004. — V. 101. — P. 13720–13725.
112. *Enfissi E. M. A., Fraser P. D., Lois L. M. et al.* Metabolic engineering of the mevalonate and non-mevalonate isopentenyl diphosphate-forming pathways for the production of health-promoting isoprenoids in tomato // *Plant Biotechnol. J.* — 2005. — V. 3. — P. 17–27.
113. *Yu O., Jung W., Shi J. et al.* Production of the isoflavones genistein and daidzein in non-legume dicot and monocot tissues // *Plant Physiol.* — 2000. — V. 124. — P. 781–794.
114. *Lukaszewicz M., Matysiak-Kata I., Skala J. et al.* Antioxidant capacity manipulation in transgenic potato tuber by changes in phenolic compounds content // *J. Agric. Food Chem.* — 2004. — V. 52. — P. 1526–1533.
115. *Shin Y., Park H., Yim S. et al.* Transgenic rice lines expressing maize C1 and R-S regulatory genes produce various flavonoids in the endosperm // *Plant Biotechnol. J.* — 2006. — V. 4. — P. 303–315.
116. *Yu O., Shi J., Hession A. O. et al.* Metabolic engineering to increase isoflavone biosynthesis in soybean seed // *Phytochemistry.* — 2003. — V. 63. — P. 753–763.
117. *Muir S. R., Collins G. J., Robinson S. et al.* Overexpression of petunia chalcone isomerase in tomato results in fruit containing increased levels of flavonols // *Nature.* — 2001. — V. 19. — P. 470–474.
118. *Austin-Phillips S., Bingham E. T., Koegel R. G. et al.* Production of industrial and animal feed enzymes in transgenic alfalfa. — 2008. ([http:// www.molecularfarming.com/non-medical.html](http://www.molecularfarming.com/non-medical.html)).
119. *Denbow D. M., Grabau E. A., Lacy G. H. et al.* Soybeans transformed with a fungal phytase gene improve phosphorus availability

- for broilers // *Poult. Sci.* — 1998. — V. 77. — P. 878–881.
120. *Brinch-Pedersen H., Olesen A., Rasmussen S. K., Holm P. B.* Generation of transgenic wheat (*Triticum aestivum L.*) for constitutive accumulation of an *Aspergillus* phytase // *Mol. Breed.* — 2000. — V. 6. — P. 195–206.
121. *International Life Sciences Institute.* Nutritional and safety assessments of foods and feeds nutritionally improved through biotechnology // *Compreh. Rev. Food Sci. Food Safety.* — 2004. — V. 3. — P. 35–104.
122. *Робинсон К.* Технология генетической модификации и пищевые продукты. Здоровье и безопасность потребителей. // *International Life Sciences Institute. ILSI Europe.* — ILSI Press Translation. — 2003. — 55 с.
123. *Lehesranta S. J., Davies H. V., Shepherd L. V. et al.* Comparison of tuber proteomes of potato varieties, landraces, and genetically modified lines // *Plant Physiol.* — 2005. — V. 138. — P. 1690–1699.
124. *Corpillo D., Gardini G., Vaira A. M. et al.* Proteomics as a tool to improve investigation of substantial equivalence in genetically modified organisms: the case of a virus-resistant tomato // *Proteomics.* — 2004. — V. 4. — P. 193–200.
125. *Shewry P. R.* Tuber storage proteins // *Ann. Bot. (Lond.).* — 2003. — V. 91. — P. 755–769.
126. *Baker J. M., Hawkins N. D., Ward J. L. et al.* A metabolomic study of substantial equivalence of field-grown genetically modified wheat // *Plant Biotechnol. J.* — 2006. — V. 4. — P. 381–392.
127. *Catchpole G. S., Beckmann M., Enot D. P. et al.* Hierarchical metabolomics demonstrates substantial compositional similarity between genetically modified and conventional potato crops // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2005. — V. 102. — P. 14458–14462.
128. *Flachowsky G.* Feeds from genetically engineering plants—Results and future challenges // *ISB News Rep.* — March 2007. — P. 4–7.
129. *Eur. Food Saf. Auth.* EFSA statement of the fate of recombinant DNA or proteins in meat, milk and eggs from animals. — 2007. (<http://www.efsa.europa.eu/EFSA/Statement/gmo> EFSA statement DNA proteins gastroint.pdf).
130. *Jonas D., Elmadfa I., Engel K.-H. et al.* Safety considerations of DNA in foods // *Ann. Nutr. Metab.* — 2001. — V. 45, N 6. — 40 p.
131. *International Life Sciences Institute.* Nutritional and safety assessments of foods and feeds nutritionally improved through biotechnology: an executive summary // *J. Food Sci.* — 2004. — V. 69. — P. 62–68.
132. *Copenhagen Consensus Center.* Copenhagen Consensus 2008 — Results. Press Release. — Copenhagen, Denmark, 30 May 2008. — 2 p.
133. *Copenhagen Consensus Center.* Copenhagen Consensus 2008 — Results. — Copenhagen, Denmark, 30 May 2008. — 6 p.
134. *Horton S., Alderman H., Rivera J.* Copenhagen Consensus 2008. — Malnutrition And Hunger. Executive Summary. — Copenhagen Consensus Center Copenhagen, Denmark, 2008. — 6 p.

БИОФОРТИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

О. М. Бурлака, Б. В. Сорочинский

Институт пищевой биотехнологии и геномики
НАН Украины, Киев

E-mail: burlaka29@gmail.com

Обсуждается проблема биофортификации, предусматривающая улучшение методами биотехнологии питательных свойств сортов сельскохозяйственных растений. Рассмотрены вопросы пищевого дефицита некоторых минералов и витаминов и негативных последствий этого для здоровья населения, которые можно уменьшить созданием и использованием в пищу растительных продуктов с улучшенными свойствами. Охарактеризованы направления и показаны достижения улучшения пищевой ценности растений методом генетической инженерии.

Ключевые слова: биофортификация, дефицит микронутриентов, генетическая инженерия, улучшение свойств растений.

BIOFORTIFICATION OF FOOD PLANTS

O. M. Burlaka, B. V. Sorochinsky

Institute of Food Biotechnology
and Genomics of National Academy
of Sciences of Ukraine, Kyiv

E-mail: burlaka29@gmail.com

Current issues concerning the biofortification of staple food plants and its application for biotechnological improvement of nutritional qualities of varieties are discussed. The problems of nutritional trace minerals and vitamins deficiencies and insufficient nourishment harmful health impacts that can be prevented by development and employment of improved plants are reviewed. Current state and progress in plants' genetic engineering for its increased nutritional value are described.

Key words: biofortification, micronutrient deficiencies, genetic engineering, plant qualities improvement.