

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ КАЛИЯ В КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЯХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Комплексные азотно-фосфорно-калийные удобрения (*NPK*), выпускаемые ОАО «Беларуськалий», содержат в своем составе основные элементы питания для растений – азот, фосфор и калий, а также добавки макро- и микроэлементов. Они производятся методом паровой грануляции и содержат в каждой грануле весь набор питательных компонентов, необходимых для роста растений, что позволяет значительно сократить по сравнению с простыми удобрениями расходы на перевозку, хранение и внесение в почву. Одним из основных элементов минерального питания растений, входящих в состав комплексных удобрений является калий. В отличие от азота и фосфора он не входит в состав органических соединений в растении, а находится в клетках растения в ионной форме в виде растворимых солей в клеточном соке и частично в виде непрочных адсорбционных комплексов с коллоидами цитоплазмы. Калий в природе представлен тремя изотопами: стабильными  $^{39}\text{K}$  (93,26 %),  $^{41}\text{K}$  (6,73 %) и радиоактивным  $^{40}\text{K}$  (0,0117 %). Несмотря на крайне низкое содержание, именно изотоп  $^{40}\text{K}$  является основным природным источником радиоактивности в живых организмах, включая растения, животных и человека. Период полураспада  $^{40}\text{K}$  составляет 1,251 млрд лет. Он распадается тремя путями:  $\beta^-$ -распад (89,28 %) с образованием  $^{40}\text{Ca}$ , электронный захват (10,72 %) с образованием  $^{40}\text{Ar}$ , крайне редкий  $\beta^+$ -распад (0,001 %). Международные и национальные нормативы не регулируют содержание  $^{40}\text{K}$  в сельскохозяйственной продукции, поскольку он относится к природным радионуклидам и не подлежит контролю в рамках радиационной безопасности пищевых продуктов. Поскольку калий является одним из основных элементов комплексных удобрений, то это требует операционного контроля его содержания [1-4]. В таблице 1 приведены требования к показателю массовая доля калия в пересчете на оксид калия для различных марок согласно технических условий производителя (таблица 1).

**Таблица 1 – Значения массовой доли калия для различных марок**

Марка	Значение массовой доли калия в пересчете на оксид калия, %
15-15-15	15±1
9-25-25	25±1
7-20-30	30±1
6-18-34	34±1

Из таблицы 1 видно, что массовая доля калия в пересчете на оксид калия варьирует в широком диапазоне от 15 до 34% с минимальным отклонением в зависимости от марки. В таблице 2 приведены основные характеристики стандартизированных методов его определения (пламенно-фотометрический метод, весовой тетрафенилборатный метод, косвенный меркуриметрический метод), а также нестандартизированный радиометрический метод, выбранный нами для исследований.

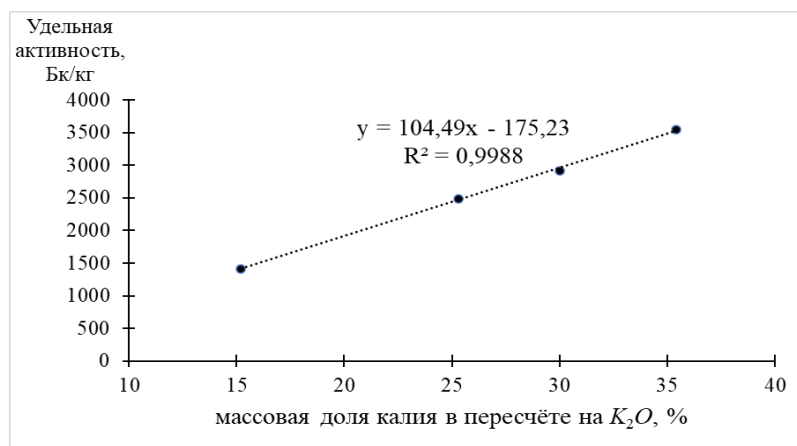
Из таблицы 2 видно, что все стандартизированные методы достаточно специфичны и характеризуются значительными недостатками, которыми не обладает радиометрический метод. Поэтому целью работы являлась оценка применимости радиометрического метода определения массовой доли калия для оперативного контроля комплексных удобрений с необходимой точностью.

**Таблица 2 – Характеристики методов определения массовой доли калия**

Характеристика	Пламенно-фотометрический метод	Весовой тетрафенилборатный метод	Косвенный меркуриметрический метод	Радиометрический метод
Длительность анализа	1 час 30 минут	4 часа	1 час 30 минут	1 час
Допустимое расхождение между параллельными измерениями	1,2%	0,4%	0,3%	2,3%
Достоинства метода	экспрессность	точность	экспрессность, точность,	Экспрессность, отсутствие пробоподготовки, простота проведения
Недостатки	Высокая стоимость и сложность оборудования, необходимость работать с горючим газом	Длительность, токсичность реактивов (ТФБ и формалин)	Применим для оценки только хлорида калия в составе, сложность установления конечной точки титрования (появление едва заметной мути), накопление отходов отработанных солей ртути	Невысокая точность

Измерение массовой доли калия в пересчёте на оксид калия радиометрическим методом основано на измерении удельной активности  $\gamma$ -излучения, образующегося в результате электронного захвата изотопом  $^{40}\text{K}$ , который входит в состав природного калия и содержание которого постоянно (0,0117 %). В связи с этим для построения

гради ровочной зависимости проводили измерение удельной активности четырех марок комплексных удобрений с различным содержанием калия в пересчете на оксид калия («15-15-15», «9-25-25», «7-20-30», «6-18-34»), точное содержание массовой доли калия в пересчете на оксид калия в которых было определено с помощью арбитражного весового тетрафенилборатного метода (рисунок).



**Рисунок – Зависимость массовой доли калия в пересчете на оксид калия от удельной активности комплексного удобрения**

При проведении эксперимента была измерена удельная активность 4-ех марок комплексных удобрений (4 уровня,  $j = 4$ ) десятью операторами на десяти разных партиях удобрений ( $i = 10$ ) в различное время (условия внутрилабораторной прецизионности), каждый из которых выполнял по 3 параллельных измерения (условия повторяемости,  $k = 3$ ). Результаты расчетов позволили оценить следующие метрологические характеристики радиометрического метода для диапазона массовой доли калия в пересчете на  $K_2O$  от 15 до 35%:

- СКО повторяемости,  $S_r - 0,7 \%$ ;
- предел повторяемости,  $r - 2,3 \%$ ;
- СКО повторяемости,  $S_R - 0,8 \%$ ;
- предел повторяемости,  $r - 2,3 \%$ ;
- расширенная неопределенность метода  $U - 1,6 \%$ .

Полученные экспериментальные данные и рассчитанные на их основании метрологические характеристики позволяют устанавливать содержание массовой доли калия в комплексных удобрениях с точностью, соответствующей требованиям техническим условиям производителя на удобрения азотно-фосфорно-калийные комплексные.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калийные удобрения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://udobreniya.info/> Дата доступа: 10.11.2025.

2. Смирнов, П. М. Агрехимия / П. М. Смирнов, Э. А. Муравин – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Колос, 1984. – С. 63-67.

3. Калий-40. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/> Дата доступа: 12.12.2025.

4. Продукция ОАО «Беларуськалий» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://belaruskali.by/products> // Дата доступа: 10.11.2025.

УДК 639.64

М. С. Мамаджанова, маг.,  
Д. Т. Мирзарахметова, проф., д-р техн. наук  
(ТМУК, г. Ташкент, Узбекистан)

### ВЫДЕЛЕНИЕ КАРОТИНОИДОВ ИЗ БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *DUNALIELLA SALINA*

В последние годы возрастает интерес к использованию микроводорослей как возобновляемого и экологически безопасного источника каротиноидов, что связано с их высокой продуктивностью и возможностью управляемого культивирования [1]. Особое внимание уделяется микроводоросли *Dunaliella salina*, способной при стрессовых условиях накапливать значительные количества  $\beta$ -каротина, превышающие показатели большинства других фотосинтезирующих организмов [2]. Эффективность получения каротиноидов определяется не только условиями культивирования, но и выбором методов экстракции и растворителей, обеспечивающих высокий выход целевых соединений при сохранении их структуры [3].

Целью данной работы являлось культивирование микроводоросли *Dunaliella salina* с переводом культуры в оранжевую фазу и экспериментальное исследование эффективности экстракции  $\beta$ -каротина из сухой биомассы микроводорослей.

Объектом исследования служила микроводоросль вида *Dunaliella salina*, выделенная из гиперсолёных озёр Приаралья.

Использована питательная среда следующего состава (г/л): NaCl – 200; MgSO<sub>4</sub> × 7H<sub>2</sub>O – 50; KNO<sub>3</sub> – 2,5; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 0,2; NaHCO<sub>3</sub> – 1,0; FeSO<sub>4</sub> × 7 H<sub>2</sub>O – следы; Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – следы; раствор микроэлементов –

1 мл. Раствор микроэлементов (г/л): H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> – 2,860; MnCl<sub>2</sub> × 4 H<sub>2</sub>O – 1,810; ZnSO<sub>4</sub> × 7 H<sub>2</sub>O – 0,222; MoO<sub>3</sub> – 0,018; NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> – 0,023. Раствор биогенных элементов (г/л): MgSO<sub>4</sub> × 7H<sub>2</sub>O – 500; KNO<sub>3</sub> – 25; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 2; NaHCO<sub>3</sub> – 10; железозаммиачные квасцы – 0,14.

Культивирование микроводоросли проводили в сосуде объемом 600 мл, содержащей 500 мл питательной среды с встроенными прозрачными полиуретановыми пластинками диаметром 7 см (25 шт)