

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ЯВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТНО-ОБУСЛОВЛЕННОЙ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

О.В. Рухович<sup>1</sup>, д.б.н., М.В. Беличенко<sup>1</sup>, к.б.н.,

Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова,  
В.А. Романенков<sup>2</sup>, д.б.н.,

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова,  
<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, E-mail [o\\_ruhovich@mail.ru](mailto:oruhovich@mail.ru)

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-14-00107

«Методологические основы оценки продукционного потенциала почв на федеральном,  
региональном и локальном уровнях»

На основе научной методологии и методики, разработанных в ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», проведена количественная оценка урожайности основных сельскохозяйственных культур, выращиваемых в Тверской области. Представлены результаты пространственно-явного (выражающегося картами) моделирования, которые показали, что микроклиматические особенности территории имеют важное значение для урожайности агрокультур. Так, именно изменением характеристик климата и рельефа объяснялось пространственное перераспределение прибавки урожая от внесения оптимальной дозы удобрений для пяти сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: Тверская область, урожайность, озимая рожь, картофель, овес, ячмень, многолетние травы, пространственно-явное моделирование, множественная регрессия, климат, рельеф, действительно возможная урожайность.

Для цитирования: Рухович О.В., Беличенко М.В., Романенков В.А. Пространственно-явное моделирование ландшафтно-обусловленной и действительно возможной урожайности сельскохозяйственных культур Тверской области // Плодородие. – 2023. – №6. – С. 35-8. DOI: 10.25680/S19948603.2023.135.09.

Хотя применение удобрений и агротехнические меры отчасти смягчают влияние условий климата, почв и рельефа на урожайность сельскохозяйственных культур, это влияние все же достаточно сильное. От этих условий, в частности, могут зависеть дозы вносимых удобрений [1]. Работы многих ученых, проведенные в течение длительного времени [2], показали, что при размещении сельскохозяйственных культур в Нечерноземной зоне важно учитывать микроклиматические изменения теплообеспеченности разных локаций. Поэтому полезно иметь представление об относительной важности (значимости) факторов среды (климата, почв и рельефа).

Для проведения анализа агроэкосистем адаптированы адекватные статистические методы множественной регрессии.

Характеристики урожайности сельскохозяйственных культур, которые были получены в ходе проведения полевых опытов с удобрениями Агрохимслужбы и Геосети [4], сравнивают с факторами среды (предикторами) – характеристиками климата, рельефа и почвенных разностей исследуемого региона с использованием матрицы размером 600 м<sup>2</sup>. Источником значений высот земной поверхности являлась SRTM30 [5], где они представлены с разрешением 30'' (около 1 км); данные о климате взяты из базы данных WorldClim [6] с усредненными ежемесячными температурами и осадками за 1950–2000 г. и представлены матрицами разрешения 30'' (около 1 км). Согласно исследованиям приземных слоев атмосферы [7], турбулентные потоки воздуха околоземной поверхности вызывают усреднение температуры воздуха, распространяющееся на сотни метров, что

соответствует размерам формы мезорельефа. Таким образом, разрешение (600 м) и транспонирование используемых матриц до 600 м учитывают как мезорельеф, так и микроклимат исследуемой территории.

Уравнения множественной регрессии рассчитывали для всех возможных четверок линейно независимых по критерию работы [8] факторов среды (предикторов) и из них отбирали имеющую наибольший коэффициент детерминации  $R^2$ . Четверки – так как пятый предиктор обычно уже незначим в модели [9]. Для расчетов использованы программы Аналитическая ГИС Эко [10], R2 [11] и [12].

Результат выражается уравнением множественной регрессии (пространственной моделью), которое содержит перечень предикторов с регрессионными коэффициентами (весами для каждого предиктора), показатели уровня значимости каждого предиктора ( $t$ -статистики) и показатель успешности проверки (верификации) полученной модели для другой выборки или подмножеств данной выборки. Для реализации системы расчетов используют несколько геоинформационных систем – MapInfo, ArcView и ГИС Эко. Далее по моделям рассчитывают матрицы и составляют карты урожайности сельскохозяйственных культур [3].

Полученные в среднем масштабе (размер пикселя 600 м) карты-матрицы (в каждом пикселе доступны числовые значения) позволяют оценивать эффективность выращивания тех или иных сельскохозяйственных культур в различных регионах.

Использование описанной выше методологии предполагает построение региональных и локальных верифицированных карт урожайности сельскохозяйственных культур. Их

наличие позволит оценить перспективность использования этих культур в различных регионах с учетом глобального изменения климата, даст возможность применять полученные результаты для меньших хозяйств на основе как полученных результатов, так и более детальных данных. Такие карты могут помочь в определении стратегии и тактики развития сельского хозяйства в стране и ее регионах.

В качестве данных используется также система поправочных коэффициентов для пересчета урожайности для отдельных полей внутри хозяйства для гармонизации влияния почвенных свойств, коррелирующих с почвенными разностями, выделяемыми на изучаемых участках, например, содержание гумуса, гранулометрический состав и др. Применение данной методики расчета имеет важные преимущества. В ней почвенное плодородие, которое, как известно, значительно изменяется во времени и пространстве, может быть максимально полно учтено на уровне архивных и современных почвенных и агрохимических обследований районов и хозяйств.

Для Тверской области осуществлены пространственное моделирование и оценка ландшафтно-обусловленной и действительно возможной урожайности (ДВУ) ячменя, овса, картофеля, озимой ржи, многолетних трав. Оценка ДВУ проведена как потенциал роста биологической продуктивности при различной интенсивности растениеводства. Взаимосвязь урожайности и максимальной прибавки урожайности с почвенными, мезорельефными и климатическими условиями оценена с применением регрессионных моделей. Установлено, что пространственная изменчивость прибавки от внесения удобрений в Тверской области объясняется влиянием ландшафтных и климатических особенностей территории. Из всех факторов, влияющих на урожайность ячменя, 66% приходится на климат и рельеф, для овса и картофеля – 64, для многолетних трав – 84%. Таким образом, характеристика рельефа и климатические особенности регионов являются значительными факторами формирования урожайности для всех перечисленных культур.

Моделирование показало, что количество осадков в июле определяет прибавку урожайности картофеля. Она уменьшается с повышением влагозапасов из-за вымокания. Также установлено, что без внесения удобрений урожайность картофеля на крутых хорошо дренированных теплых юго-западных склонах выше, а снижаться будет при обильных осадках августа. Еще один фактор, существенно влияющий на урожайность картофеля в Тверской области, – абсолютная высота территории,

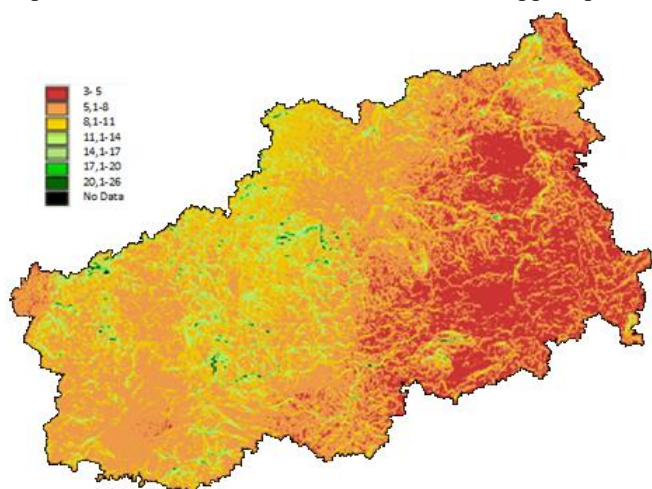


Рис. 1. Визуализация модели максимальной прибавки урожайности озимой ржи (ц/га) от оптимальных доз применения удобрений в Тверской области

поскольку вместе с её возрастанием происходят рост гидротермического коэффициента (ГТК) и снижение урожайности картофеля. Это явление характерно для всей южной части Нечерноземной зоны, но в Тверской области с ростом абсолютной высоты оно наиболее заметно [13]. Необходимо отметить, что с увеличением абсолютной высоты повышаются эрозийная опасность и степень расчлененности поверхности, что приводит к росту мелкоконтурности полей. Все эти факторы не могут не влиять на ухудшение качества механической обработки почв и в итоге приводить к снижению урожая картофеля. Для успешного возделывания данной культуры оптимальна высота ниже 160 м над уровнем моря.

Озимая рожь дает наибольшую прибавку урожайности при обильных осадках в феврале, которые поддерживают высоту снежного покрова, обеспечивая защиту осенних всходов от вымерзания. Важную роль в формировании урожая зерновых на юге Нечерноземной зоны играют температуры января. Поскольку оптимальными для зерновых являются январские температуры от -12 до -14°C, а на территории Тверской области озимые подвержены выреванию, то решение этой проблемы заключается в размещении посевов на полях южных и западных склонов. При этом и весной расположение полей с озимой рожью на крутых, освещенных с юга, склонах обеспечивает наилучший прогрев почвы.

Согласно моделям, для повышения урожайности многолетних трав очень важно расположение полей в долинах. Что касается влияния климатических особенностей на формирование урожая, то избыточные осадки в апреле приводят к вымоканию и гибели побегов, а также способствуют смыву семян поверхностными потоками. При экстенсивной технологии выращивания посевы многолетних трав весьма чувствительны к низким температурам февраля из-за опасности вымерзания, наиболее благоприятны для них пологие участки северных склонов долин в западных районах области, а при интенсивной технологии для получения максимального количества сена многолетних трав важно расположение полей в долинах на верхних частях склонов северной экспозиции, а также желательны не очень высокие температуры июня.

Полученные результаты были визуализированы в виде карт урожайности для каждой культуры на территории Тверской области (рис. 1, 2).

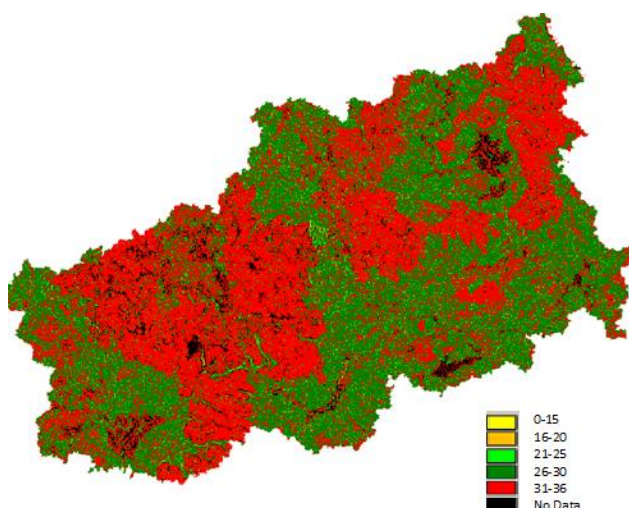


Рис. 2. Визуализация модели выращивания ячменя (ц/га) с использованием высоких технологий в Тверской области

На основе данных полевых опытов с удобрениями Агротехслужбы и Геосети разработаны поправочные коэффициенты пересчета ландшафтно-обусловленной урожайности, полученной в результате моделирования, в действительно возможную для территорий хозяйств и отдельных полей. Коэффициенты зависят от гранулометрического состава почв, содержания органического вещества, почвенной кислотности, обеспеченности почвы подвижным фосфором, а также от биологических особенностей возделываемой культуры (табл. 1).

Внесение оптимальных доз удобрений по контурам полей – основное условие для получения действительно возможной урожайности. При выполнении данного условия в хозяйствах и на отдельных полях Тверской области поправочные коэффициенты могут быть использованы для расчета действительно возможной урожайности. Свойства почв можно узнать из материалов сплошного агрохимического обследования ГЦАС «Тверской» и «Нелидовская».

1. Элементы системы поправочных коэффициентов для пересчета урожайности для отдельных полей внутри хозяйства

| Почвы по гранулометрическому составу | Гумус, % | pH   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г | Яровые зерновые |        | Озимая пшеница | Картофель | Травы      |             | Пастбища |
|--------------------------------------|----------|------|--|-----------------|--------|----------------|-----------|------------|-------------|----------|
|                                      |          |      |  | овес            | ячмень |                |           | однолетние | многолетние |          |
|                                      |          |      |  |                 |        |                |           |            |             |          |
| Песчаные                             | <1,5     | <4,5 | <5                                       | 0,10            | 0,10   | 0,10           | 0,10      | 0,10       | 0,10        | 0,10     |
|                                      |          |      | 5-15                                     | 0,10            | 0,10   | 0,10           | 0,10      | 0,10       | 0,10        | 0,10     |
| Супесчаные                           | <1,5     | <4,5 | <5                                       | 0,10            | 0,10   | 0,10           | 0,14      | 0,10       | 0,10        | 0,10     |
|                                      |          |      | 5-15                                     | 0,10            | 0,10   | 0,10           | 0,14      | 0,10       | 0,10        | 0,10     |
| Легкосуглинистые                     | <2,0     | <4,5 | <5                                       | 0,22            | 0,22   | 0,10           | 0,18      | 0,22       | 0,22        | 0,10     |
|                                      |          |      | 5-15                                     | 0,34            | 0,34   | 0,14           | 0,22      | 0,34       | 0,34        | 0,14     |
| Суглинистые                          | <2,0     | <4,5 | <5                                       | 0,22            | 0,22   | 0,18           | 0,30      | 0,22       | 0,22        | 0,18     |
|                                      |          |      | 5-15                                     | 0,34            | 0,34   | 0,26           | 0,34      | 0,34       | 0,34        | 0,26     |
|                                      |          |      | >15                                      | 0,46            | 0,46   | 0,30           | 0,36      | 0,46       | 0,46        | 0,30     |
| Тяжелосуглинистые и глинистые        | <2,0     | <4,5 | <5                                       | 0,14            | 0,14   | 0,10           | 0,10      | 0,14       | 0,14        | 0,10     |
|                                      |          |      | 5-15                                     | 0,22            | 0,22   | 0,10           | 0,10      | 0,22       | 0,22        | 0,10     |
|                                      |          |      | >15                                      | 0,30            | 0,30   | 0,10           | 0,10      | 0,30       | 0,30        | 0,10     |
|                                      |          |      | 5,5-5,0                                  | <5              | 0,26   | 0,26           | 0,10      | 0,14       | 0,26        | 0,26     |

В таблице 2 в качестве примера приведены рекомендуемые дозы удобрений для получения действительно возможного урожая на полях с применением разного уровня интенсивности агротехнологий сельскохозяйственных культур. Так, в экстенсивной технологии при планируемой урожайности озимой ржи 20-30 ц/га необходимо 55-150 кг д.в/га NPK, при среднем уровне технологической интенсивности и планируемой урожайности

31-35 ц/га – 120-220 кг д.в/га, а при интенсивной технологии возделывания и предполагаемой урожайности озимой ржи 36-50 ц/га – 320 кг д.в/га. Интенсивность технологии предусматривает и проведение в оптимальные сроки обширного комплекса технологических операций: известкование, при необходимости, кислых почв, оптимальное чередование культур в севообороте, применение химических средств защиты растений и др. [14].

2. Планируемые дозы удобрений, кг д.в/га, для получения действительно возможного урожая по полям в Тверской области

| № поля | Планируемая урожайность озимой ржи, ц/га |    |    |       |     |    |       |     |    |       |     |     |
|--------|--|----|----|-------|-----|----|-------|-----|----|-------|-----|-----|
|        | 20-30                                    |    |    | 31-35 |     |    | 36-40 |     |    | 41-50 |     |     |
|        | N  | P  | K  | N     | P   | K  | N     | P   | K  | N     | P   | K   |
| 1      | 15                                       | 30 | 40 | 40    | 80  | 60 |       |     |    |       |     |     |
| 5      | 60                                       | 30 | 20 | 40    | 100 | 60 |       |     |    |       |     |     |
| 7      | 60                                       | 70 | 20 |       |     |    |       |     |    |       |     |     |
| 8      | 30                                       | 70 | 40 | 60    | 100 | 60 | 70    | 120 | 80 | 80    | 140 | 100 |
| 12     | 30                                       | 70 | 20 |       |     |    |       |     |    |       |     |     |
| 15     | 15                                       | 50 | 20 | 40    | 40  | 40 |       |     |    |       |     |     |
| 16     | 15                                       | 20 | 20 | 40    | 80  | 40 | 60    | 100 | 60 |       |     |     |

Полученные с помощью моделирования уровни действительно возможной урожайности, которые можно получить на конкретном поле, позволяют выбрать экономически оправданную технологию возделывания сельскохозяйственных культур.

**Заключение.** Таким образом, на основании расчетной информации о получении действительно возможной урожайности, максимальной для реального уровня плодородия каждого поля, которая получена на основе моделирования ландшафтно-обусловленной урожайности с использованием понижающих коэффициентов, появляется возможность выбора оптимальной технологии возделывания с.-х. культур в зависимости от потребностей и финансовых возможностей пользователя.

1. Шафран С.А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях // Агротехнология. - 2020. - № 6. - С. 14-21.
2. Грингоф И.Г., Клеценко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1. - Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011.- 808 с.
3. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агротехнология. - 2011. - № 2. - С. 57-81.
4. Сычев В.Г., Рухович О.В., Романенков В.А., Беличенко М.В., Листова М.П. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агротехслужбы и Геосети -Агрогеос // Проблемы агрохимии и экологии. - 2008. - №5. - С.55-58.
5. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.
6. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2005. V. 25. P. 1965-1978.

Литература



7. Floors, R. R., Nahmann, A. N., & Pena Diaz, A. (2018). Evaluating Mesoscale Simulations of the Coastal Flow Using Lidar Measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(5), 2718-2736. <https://doi.org/10.1002/2017JD027504>.

8. Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрацией металлов и рельефом // Почвоведение. – 2013. – № 11. – С. 1344–1356.

9. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Предсказательное моделирование характеристик урожая озимой пшеницы // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. – С. 310-326.

10. Рухович О.В., Шарая Л.С., Шарый П.А., Романенков В.А. Прогнозирование урожая озимой пшеницы в агроландшафтах методами геоморфометрии // Плодородие. – 2009. – № 5. – С. 22-24.

11. Шарый П.А., Шарая Л.С., Рухович О.В. Методы прогноза урожайности озимой пшеницы в бассейне р. Оки с использованием рельефа, климата и почв // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Т. 3. Мониторинг и моделирование ландшафтов/ Под ред. акад. РАН В.Г. Сычева, Л. Мюллера. – М.: Изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. Гл. 3/69. – С. 328-333.

12. Шкуркин С.И., Рухович О.В., Рухович Г.Д. Программа ЭВМ "Расчет влияния природно-климатических факторов на урожайность с.-х. культур". Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021618680, 31.05.2021. Заявка № 2021617975 от 25.05.2021.

13. Иванов Д.А., Рубцова Н.Е. Адаптивные реакции сельскохозяйственных растений на ландшафтные условия Нечерноземья. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2007. – 356 с.

14. Рухович О.В., Романенков В.А., Ермаков А.А. Урожайность сельскохозяйственных культур в зависимости от условий агроландшафта // Плодородие. – 2014. – № 3. – С.12-14.

## SPATIAL AND TEMPORAL MODELING OF LANDSCAPE-CONDITIONED AND REALLY POSSIBLE YIELDS FOR AGRICULTURAL CROPS OF THE TVER REGION

*O.V. Rukhovich, Ph.D., Doctor of Biological Sciences, All-Russian Research Institute of Agrochemistry, E-mail o\_ruhovich@mail.ru, M.V. Belichenko Ph.D., All-Russian Research Institute of Agrochemistry, V.A. Romanenkov, Ph.D., Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Lomonosov Moscow State University*

*Based on the scientific methodology and methodology developed at the Federal State Budgetary Research Institute of Agrochemistry, a quantitative assessment of the yield of the main crops grown in the Tver region was carried out. The results of spatially explicit (i.e. expressed by maps) modeling are presented, which showed that the microclimatic features of the territory are important for the yield of agricultural crops. When using the characteristics of the relief and climate, from 64 to 83% of the spatial variability of the maximum increase in the yield of five crops obtained when applying the optimal dose of fertilizers was explained by these predictors. Keywords: Tver region, yield, winter rye, oats, barley, potatoes, perennial grasses, spatially explicit modeling, multiple regression, climate, relief, really possible yield.*

УДК 631.811.98

DOI: 10.25680/S19948603.2023.135.10

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА КЛАССА ЦИТОКИНИНОВ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУРАХ

*О.А. Шаповал, д.с.-х.н., И.П. Можарова, к.с.-х.н., А.А. Коршунов, к.с.-х.н., ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» имени Д.Н. Прянишникова 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31А, e-mail: elgen@mail.ru*

*Представлены результаты полевых испытаний регуляторов роста растений: препарата класса цитокининов на примере яблони и многокомпонентного препарата на основе ауксина, гиббереллина и цитокинина на примере кукурузы. На культуре яблони в Московской и Тамбовской областях по комплексу показателей получены лучшие результаты при применении 6-бензиладенина в дозах 1,5- 3,0 л/га. Установлено положительное действие препарата, проявляющееся в увеличении генеративной и вегетативной продуктивности растений. Повышение урожайности колебалось в зависимости от зоны исследований от 50-70% в Московской области до 20-34% в Тамбовской области. На кукурузе в условиях Краснодарского края при применении комбинированного препарата (6-фурфуриламинопурин + гиббереллиновая кислота АЗ + 4 (индол-Зил) масляная кислота) установлен синергический эффект, способствующий не только усилению вегетативного роста растений, но и плодообразованию. Препарат в дозе 0,35 л/га повысил урожай кукурузы в початках на 10,3 % и зерна – на 16,4 %, при урожайности на контроле – 80,8 и 61,7 ц/га соответственно.*

*Ключевые слова: яблоня, кукуруза, цитокинины, гиббереллины, регуляторы роста, вегетативный рост, плодообразование, урожайность.*

Для цитирования: Шаповал О.А., Можарова И.П., Коршунов А.А. Эффективность применения синтетических регуляторов роста класса цитокининов на сельскохозяйственных культурах // Плодородие. – 2023. – №6. – С. 38-42. DOI: 10.25680/S19948603.2023.135.10.

Использование регуляторов роста растений возможно на всех этапах сельскохозяйственного производства – от протравливания семян до обработок растений в конце вегетации для повышения сохранности продукции или посевного/посадочного материала, при закладке на длительное хранение, то есть от развития зародыша из оплодотворенной яйцеклетки до окончания жизненного

цикла растений. Это обусловлено тем, что все этапы онтогенеза сопровождаются регулированием природными фитогормонами. Поиск веществ с физиологической активностью привели к открытию большого числа регуляторов роста растений и гербицидов. Большинство синтетических регуляторов либо является физиологическими